

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.009

基于多新息最小二乘算法的电力线路参数辨识

原康康¹, 卫志农¹, 段方维², 刘芮彤², 徐伟³, 严明辉³

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 3. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:随着电力系统的建设和发展, 电网结构日益复杂, 由于线路长期运行、周围环境变化等原因导致原有的线路参数模型与实际线路参数存在偏差, 从而影响电力系统的实时监控和优化运行。考虑到电力系统输电线路中的数据采集与监控(SCADA)系统量测充足, 提出基于多新息最小二乘(MILS)算法的线路参数辨识模型, 实现全网线路的准确辨识和校正。首先, 利用实时数字仿真(RTDS)系统搭建 IEEE 39 节点电力系统仿真模型, 获得潮流运行数据; 然后, 在 Matlab 中进行参数辨识, 将辨识结果与 RTDS 中的线路参数进行对比。结果表明, 基于 MILS 算法的参数辨识结果具有较高估计精度, 可作为电力系统可疑线路判断依据。

关键词:电力线路; 参数辨识; 多新息最小二乘(MILS)算法; 数据采集与监控(SCADA)系统; 实时数字仿真(RTDS)系统

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)04-0055-06

0 引言

为了满足社会经济发展过程中的电力需求, 我国电网规模不断扩大。随着特高压大容量交直流输电、综合能源互联网等技术的应用, 电网结构日益复杂, 对电网的安全稳定运行提出了挑战。目前, 电力系统规划、设计、运行、控制等都基于电力设备模型进行分析, 在实际工程应用中, 由于电力设备长期运行、周围环境变化等原因, 电力设备使用参数与实际参数存在偏差, 电网的安全稳定分析计算结果可信度变差, 影响电网安全稳定运行^[1-6]。

输电线路是电力系统最主要的设备之一, 其参数准确性直接关系到潮流计算、状态估计、保护整定、故障定位等运行控制计算的结果, 因此获取真实线路参数具有重要意义^[7-10]。输电线路参数从获取方法可分为理论计算法、参数实测法、基于实测数据的线路参数辨识等。理论计算法利用输电线路的自几何均距、互几何均距以及导线材料结构等物理参数, 依据公式计算出输电线路阻抗和导纳。理论计算法极大简化了输电线路的电磁模型, 导致计算结果与实际情况不吻合, 且由于线路运行工况的变化, 理论计算法无法反映输电线路真实参数的实际变化情况^[11-12]。参数实测法主要为注入测量法, 即待测量线路不停电或者不完全停电, 以全球定位系统(global positioning system, GPS)提供的时间脉冲为基础, 人工加入电压、电流信号, 并通

过输电线路模型计算出相应的参数, 该方法需要附加实验装置设备, 且仍是对特定工况下线路参数的求取^[12-13]。基于实测数据的线路参数辨识主要是通过电网输电线路安装的数据采集与监控(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统或相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)采集电网实际运行量测数据, 根据实际数据结合参数辨识算法进行线路参数辨识^[14-15]。由于 PMU 在电网中安装数量有限, 故基于 SCADA 数据的电力线路参数辨识应用更为普遍。相比传统最小二乘算法, 多新息最小二乘(multi-innovation least squares, MILS)算法基于多新息理论将标量新息扩展为向量新息或者新息矩阵, 充分利用 SCADA 系统采集的当前及历史断面量测数据, 提高数据利用效率, 提升算法收敛速度及参数辨识精度, 能适应多输入多输出、多输入单输出等各种模型^[16-18]。文中采用 SCADA 量测数据结合 MILS 算法对全系统输电线路进行参数辨识。

1 基于 SCADA 量测的输电线路集中参数模型

目前电力系统已经普遍装设了 SCADA 系统, 通过 SCADA 系统可以直接获得线路两端有功功率、无功功率、电压幅值的量测数据, 实现全网线路的统一参数辨识^[10, 19]。在电力系统建模和计算中, 输电线路通常采用 π 型等效电路模型^[20], 如图 1 所示。

图 1 中, $Z=R+jX$ 为输电线路阻抗, I_z 为通过线

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-03-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904500)

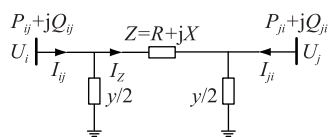


图1 输电线路 π 型等效电路模型

Fig.1 π-type equivalent circuit model of transmission line

路阻抗的电流; y 为输电线路对地电纳,忽略输电线路对地电导; U_i, U_j 分别为节点 i, j 的电压幅值; I_{ij} 为节点 i 流向节点 j 的电流幅值; P_{ij}, Q_{ij} 分别为节点 i 流向节点 j 的有功和无功功率; I_{ji} 为节点 j 流向节点 i 的电流幅值; P_{ji}, Q_{ji} 分别为节点 j 流向节点 i 的有功和无功功率。由图 1 功率传输关系可得:

$$P_{ij} + jQ_{ij} + jU_i^2 y/2 - I_Z^2 (R + jX) = P_{ji} + jQ_{ji} + jU_j^2 y/2 \quad (1)$$

其中:

$$I_Z = \sqrt{\frac{P_{ij}^2 + (Q_{ij} + U_i^2 y/2)^2}{U_i^2}} \quad (2)$$

将式(1)实部和虚部分解可得:

$$(P_{ij} - P_{ji})U_i^2 = [(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2), Q_{ij}U_i^2, U_i^4/4] [R, Ry, Ry^2]^T \quad (3)$$

$$(Q_{ji} - Q_{ij})U_i^2 = [(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2), Q_{ij}U_i^2, U_i^4 y/4, (U_j^2 - U_i^2)U_i^2 y/2] [X, Xy, Xy^2, y]^T \quad (4)$$

2 MILS 算法

MILS 算法根据多新息理论将标量新息扩展为新息向量,将观测向量扩展为观测矩阵、堆积系统输出的参数辨识算法^[21-22]。与传统递推最小二乘辨识算法相比,MILS 算法对当前及历史断面新息利用率更高,且考虑噪声对辨识精度的影响,算法收敛速度更快,参数辨识精度更高。式(3)、式(4)均可用式(5)的辨识模型表示。

$$z_k = \varphi_k l + v \quad (5)$$

式中: k 为某一时间断面; z_k 为可观测量(即辨识模型输出); φ_k 为量测向量(n 维行向量, n 为待辨识参数数量); l 为待辨识参数向量(n 维列向量); v 为零均值高斯随机白噪声。

该辨识模型中标量新息表示为:

$$e_k = z_k - \varphi_k l \quad (6)$$

由于线路参数在一定时间内变化缓慢,将标量新息扩展为新息向量:

$$E_{p,k} = \begin{bmatrix} z_k - \varphi_k l \\ z_{k-1} - \varphi_{k-1} l \\ \vdots \\ z_{k-p+1} - \varphi_{k-p+1} l \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: p 为新息长度。系统最小二乘辨识算法模型表示为:

$$Y(p, k) = \Phi(p, k)l(k-1) + E(p, k) \quad (8)$$

式中: $Y(p, k)$ 为输出向量; Φ 为新息矩阵。表示如下:

$$Y(p, k) = \begin{bmatrix} z_k \\ z_{k-1} \\ \vdots \\ z_{k-p+1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_k \\ \varphi_{k-1} \\ \vdots \\ \varphi_{k-p+1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

目标函数 J 为新息向量的 2 范数最小。 J 表示为:

$$J = \sum_{j=1}^k \|Y(p, j) + \Phi(p, j)l\|^2 \quad (11)$$

取

$$Z = \begin{bmatrix} Y(p, 1) \\ Y(p, 2) \\ \vdots \\ Y(p, k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$H = \begin{bmatrix} \Phi(p, 1) \\ \Phi(p, 2) \\ \vdots \\ \Phi(p, k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

则:

$$J = \|Z - HL\|^2 \quad (14)$$

目标函数 2 范数最小时即得待辨识参数,由最小二乘法的最优估计准则可得待辨识参数辨识结果为:

$$\hat{l}_{MILS} = (H^T H)^{-1} H^T Z \quad (15)$$

对系统电力线路进行参数辨识时,读取当前线路两端有功量测、无功量测、电压量测,通过 MILS 算法对该线路电阻、电抗、电纳进行辨识,然后顺序进行其他线路参数辨识,直至全系统线路参数辨识完成,具体流程见图 2。

3 仿真验证

3.1 实时数字仿真系统

在实际电力系统中,由于 SCADA 装置并不能覆盖全部节点,且 SCADA 量测本身也存在误差,因而采用量测数据或状态估计数据进行电力线路参数辨识时无真实数据进行对比,无法准确验证相应估计结果的准确性。基于上述原因,通过实时数字

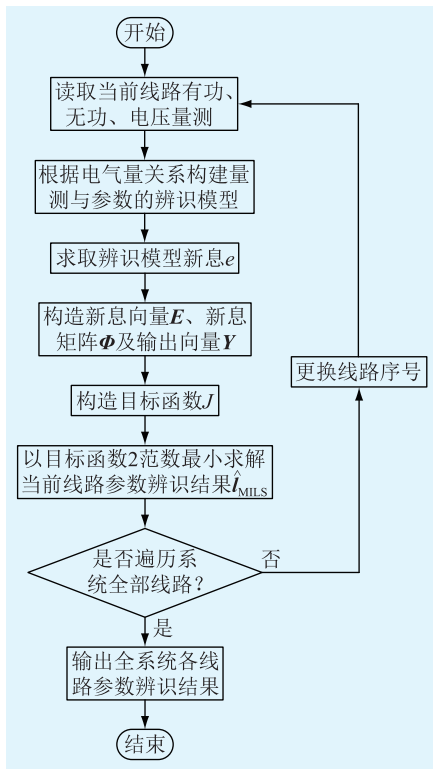


图2 参数辨识流程

Fig.2 Parameter identification flow

仿真(real time digital simulation, RTDS)系统获取基本线路参数和潮流运行数据,在潮流数据的基础上添加噪声作为量测量,从而进行电力线路参数辨识。在RTDS中搭建IEEE 39节点系统,如图3所示,获得基本潮流数据,再添加噪声模拟量,采用MILS算法进行电力线路参数辨识。

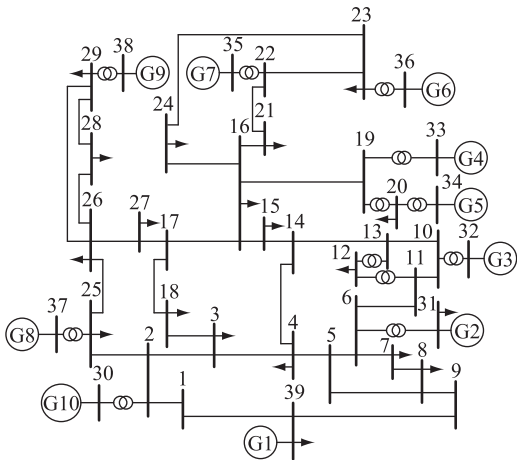


图3 IEEE 39节点系统

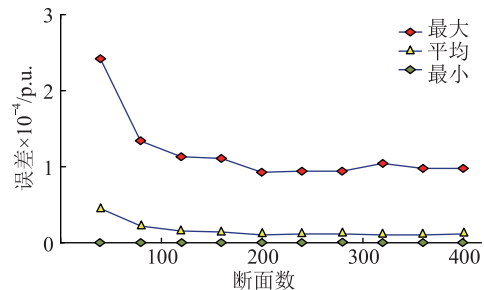
Fig.3 IEEE 39-bus System

3.2 电力线路参数辨识结果分析

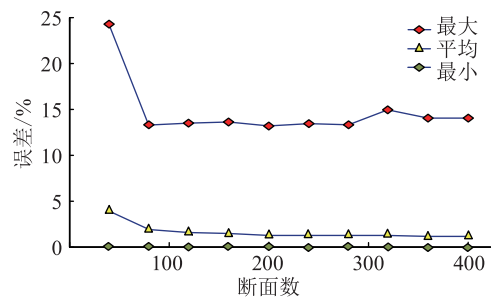
在RTDS系统中对IEEE 39节点系统进行潮流运算,获取不同时间断面的潮流数据,通过向各个节点注入功率、向支路功率及节点电压幅值的潮流计算值添加高斯白噪声,模拟实际的量测数据。基

于多时间断面量测数据进行全网线路参数辨识。分别采用40~400个时间断面的量测数据(以40个断面数递增)进行全网线路参数辨识,并对不同断面数下全网46条线路参数辨识结果进行误差统计。

线路电阻参数辨识误差见图4。在大于200个断面进行参数辨识时,线路电阻平均绝对误差为 1.16×10^{-5} p.u.,最大绝对误差为 1.03×10^{-4} p.u.,如图4(a)所示;线路电阻平均相对误差为1.23%,最大相对误差为14.60%,如图4(b)所示。



(a) 绝对误差



(b) 相对误差

图4 线路电阻参数辨识结果

Fig.4 Identification results of line resistance

线路电抗参数辨识误差如图5所示。可以看出,基于较少时间断面量测数据进行电抗辨识时,相应的估计误差较大,随着断面数增加,线路电抗辨识误差逐步改善。当时间断面达到300个及以上时,线路电抗平均绝对误差为 6.62×10^{-3} p.u.,最大绝对误差为 9.55×10^{-2} p.u.,如图5(a)所示;线路电抗平均相对误差为22.40%,最大相对误差为96.70%,如图5(b)所示。

线路电纳参数辨识误差如图6所示。线路电纳绝对误差整体表现较好,当量测的时间断面较少时仍有较好的辨识效果;相对误差在低断面数时效果较差,但随着断面数增加逐渐改善。当量测的时间断面达到200个及以上时,线路电纳平均绝对误差为 9.69×10^{-2} p.u.,最大绝对误差为1.30 p.u.,如图6(a)所示;线路电纳平均相对误差为19.10%,最大相对误差为87.40%,如图6(b)所示。

根据上述误差分析结果可知,当量测时间断面在200个及以上时,线路电阻、电纳均有较好的误差

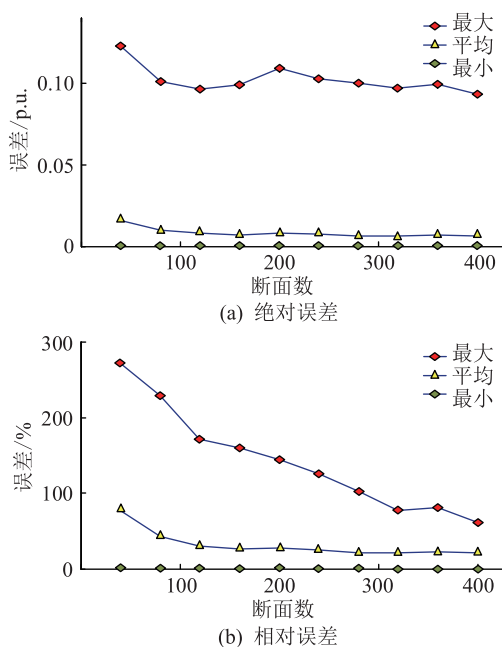


图5 线路电抗参数辨识结果

Fig.5 Identification result of line reactance

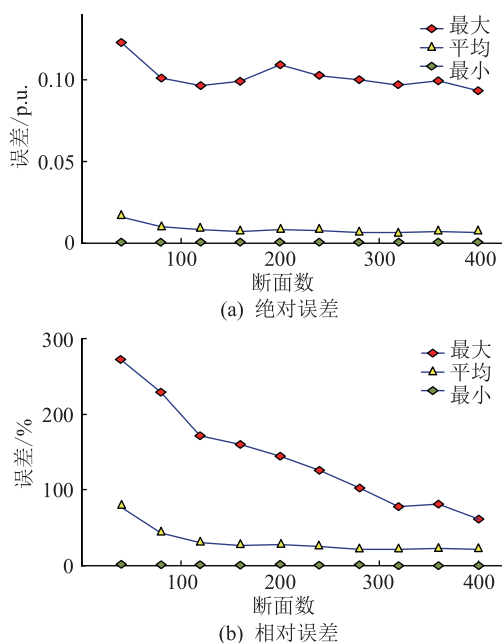


图6 线路电纳参数辨识结果

Fig.6 Identification result of line susceptance

表现,辨识结果较准确;当时间断面在300个及以上时,线路电抗参数辨识精度基本保持不变,误差达到理想范围。由于在实际分析运算中,线路电抗受潮流计算、状态估计等程序计算影响较大,因此建议取300个以上断面进行参数辨识,结果更为可靠。

4 结论

考虑到实际电网中 SCADA 量测冗余度较高,提出基于 MILS 算法对电力线路进行参数辨识,以

期解决线路参数模型偏离实际运行情况的问题。在 RTDS 和 Mtlab 中,对 IEEE 39 节点系统进行仿真测试,结果表明至少需要 300 个时间断面的量测数据,可使线路电阻、电抗、电纳参数辨识的平均相对误差保持在 20% 以内。可见,文中提出的基于 SCADA 量测数据的 MILS 算法参数辨识结果精度较高,可为电网可疑线路辨识提供参考依据。

参考文献:

[1] 万黎升,李予辰,曹洋. 泛在电力物联网下基于调控云的线路状态感知监测及数据共享研究[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(11):32-37.
WAN Lisheng, LI Yuchen, CAO Yang. Research on transmission line state-aware monitoring and data sharing based on dispatching and control cloud under ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(11): 32-37.

[2] 颜伟,赵雪骞,陈俊,等. 电网设备错误参数的支路量测标幺值残差代数和均值辨识法[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):99-103.
YAN Wei, ZHAO Xueqian, CHEN Jun, et al. Grid equipment parameter error identification based on mean algebraic sum of branch measurement normalized residuals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 99-103.

[3] 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):25-27,31.
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, 31.

[4] 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,2012.
DING Lan. Study on parameter identification of transmission line and Thevenin equivalent based on PMU [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

[5] 段玉飞,王伟. 基于物联网的输电线路智能监测系统研究与应用[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(7):21-28.
DUAN Yufei, WANG Wei. Research and application of intelligent monitoring system for transmission line based on internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(7): 21-28.

[6] 梁振锋,张晓阳,张惠智,等. 基于故障录波数据的故障线路参数计算[J]. 智慧电力,2018,46(8):39-44.
LIANG Zhenfeng, ZHANG Xiaoyang, ZHANG Huizhi, et al. Fault line parameters calculation based on fault recording data [J]. Smart Power, 2018, 46(8): 39-44.

[7] 李澄,鲍有理,黄瑜,等. 不受线路参数变化影响的故障测距原理研究[J]. 江苏电机工程,2016,35(5):67-70.
LI Chen, BAO Youli, HUANG Yu, et al. Research on fault location unaffected by parameters for transmission lines[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 67-70.

[8] 王顺江,孙乔,侯验秋,等. 基于状态估计及综合可疑度的参

- 数辨识和修正方法[J]. 中国电力,2020,53(2):36-42.
- WANG Shunjiang, SUN Qiao, HOU Yanqiu, et al. The identification and correction method of grid parameters based on the state estimation and comprehensive suspicious index[J]. Electric Power, 2020, 53(2):36-42.
- [9] 颜全椿, 郑明忠, 梁伟. 计及距离空间的电网参数误差支路选取方法[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(5):25-28, 33.
- YAN Quanchun, ZHENG Mingzhong, LIANG Wei. Analysis of the power material apportionment involved in protocol based on inventory model[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(5):25-28, 33.
- [10] ZHAO J, FLISCOUNAKIS S, PANCIATICI P, et al. Robust parameter estimation of the french power system using field data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5):5334-5344.
- [11] 施佳锋. 基于 SCADA 遥测数据的线路参数辨识系统的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2015.
- SHI Jiafeng. Research on line identification system base on SCADA telemetry data [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [12] 宋晓燕, 孙岩洲, 宋紫嫣, 等. 基于零序 PT 二次侧注入信号的配电网电容电流测量新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19):134-138.
- SONG Xiaoyan, SUN Yanzhou, SONG Ziyan, et al. A new method of distribution network capacitive current measurement based on injecting signals into the secondary side of the zero sequence PT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19):134-138.
- [13] 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.
- [14] 戴长春, 王正风, 张兆阳, 等. 基于 IGG 准则的抗差最小二乘输电线路参数辨识[J]. 现代电力, 2014, 31(2):37-41.
- DAI Changchun, WANG Zhengfeng, ZHANG Zhaoyang, et al. Robust least square estimation for transmission line parameter identification based on IGG criterion[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(2):37-41.
- [15] 陈俊. 基于多时段量测的电网设备参数辨识与估计方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- CHEN Jun. Research on method of grid equipment parameter identification and estimation based on multi-period measurement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [16] 丁峰. 系统辨识:多新息辨识理论与方法[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- DING Feng. System identification: multi-innovation identification theory and method[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [17] 寇攀高, 周建中, 肖剑, 等. 基于多新息最小二乘法的同步发电机一次性抛载试验参数辨识[J]. 电网技术, 2013, 37(2):378-384.
- KOU Pangao, ZHOU Jianzhong, XIAO Jian, et al. Multi-innovation least square algorithm-based parameter identification for synchronous generator by once-only load rejection test [J]. Power System Technology, 2013, 37(2):378-384.
- [18] 索江镭, 胡志坚, 刘宇凯, 等. 基于多新息耦合最小二乘算法的电力系统状态空间辨识[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7):65-73.
- SUO Jianglei, HU Zhijian, LIU Yukai, et al. Power system state space identification based on multi-innovation coupling least square algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7):65-73.
- [19] 苏蓉, 赵俊博, 张葛祥, 等. 一种计及全量测相关性的混合电力系统状态估计方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2651-2658.
- SU Rong, ZHAO Junbo, ZHANG Gexiang, et al. A hybrid power system state estimation method considering measurement correlations [J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2651-2658.
- [20] 薛安成, 徐飞阳, 游宏宇, 等. 基于微型 PMU 的配电网抗差参数辨识[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2):1-7, 43.
- XUE Ancheng, XU Feiyang, YOU Hongyu, et al. Intelligent harmonious collocation for reactive power compensation of distribution network combining planning and operation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):1-7, 43.
- [21] 张秀丽, 黄旭, 杨德亮, 等. 基于正交投影与多新息 RLS 的 PMSM 参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14):33-39.
- ZHANG Xiuli, HUANG Xu, YANG Deliang, et al. Identification of PMSM based on orthogonal projection and multi-innovation RLS combined algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14):33-39.
- [22] 刘芳芳, 任晓明. 基于多新息最小二乘算法的非线性系统辨识[J]. 自动化仪表, 2019, 40(9):26-29.
- LIU Fangfang, REN Xiaoming. Nonlinear system identification based on multi-innovation least squares algorithm[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(9):26-29.

作者简介:



原康康

原康康(1993),男,硕士在读,研究方向为电力系统状态估计及参数辨识(E-mail:503478066@qq.com);

卫志农(1962),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统运行分析与控制;

段方维(1989),女,硕士,工程师,从事电力能源建设相关工作。

Power line parameter identification based on multi-innovation least square algorithm

YUAN Kangkang¹, WEI Zhinong¹, DUAN Fangwei², LIU Ruitong², XU Wei³, YAN Minghui³

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Shenyang 110006, China;

3. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: With the construction and development of power system, the structure of power grid is becoming more and more complex. Due to the long-term operation of power lines and changes in the surrounding environment, deviations exist between the original line parameters model and the actual line parameters, which affect the real-time monitoring and optimal operation of power system. Considering the sufficient measurement of data acquisition and monitoring system (SCADA) in power system transmission lines, a line parameter identification model is presented based on multi-innovation least squares (MILS) algorithm in order to achieve accurate identification and correction of the whole network lines. IEEE 39-bus power system simulation model is built on real-time digital simulation (RTDS) platform to obtain power flow operation data. Then, parameter identification is carried out in Matlab environment, and the identification results are compared with the line parameters on RTDS platform. The results show that the parameters identification results based on MILS algorithm have high estimation accuracy, and can be used as the basis for judging suspicious lines in power system.

Keywords: power line; parameter identification; multi-innovation least squares (MILS) algorithm; supervisory control and data acquisition (SCADA) system; real-time digital simulation (RTDS) system

(编辑 吴楠)

(上接第 47 页)

Emergency frequency control for large-scale disconnection of renewable energy in the UHVDC sending grid

HUO Chao¹, LI Zhaowei^{2,3}, KE Xianbo¹, QIE Zhaohui^{2,3}, WANG Chao^{2,3}, TU Jingzhe⁴

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China; 2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: With promotion and application of ultra high voltage direct current (UHVDC) and continuous increase of renewable energy power generation proportion, Chinese energy transformation strategy is strongly supported. However, due to the poor network-related protection performance of renewable energy units in the DC sending power grid where renewable energy is centrally connected, AC and DC faults can easily result in large-scale disconnection of renewable energy, which brings great challenge for power system transient frequency security. The failure process of large-scale disconnection of renewable energy from the UHVDC receiving grid is firstly analyzed. Then, the existing measures to deal with disconnection of renewable energy are discussed. The emergency control technical scheme using the information of DC commutation failure is designed according to the characteristics of fault process. Finally, a simulation example of the northwest power grid is built to verify that the proposed frequency emergency control strategy can effectively deal with the problem of large-scale renewable energy off-grid caused by AC and DC faults, and greatly improve the UHVDC transmission capacity and renewable energy generation of the power grid.

Keywords: renewable energy off-grid; ultra high voltage direct current (UHVDC); low voltage ride through; emergency control; frequency security

(编辑 吴楠)