

DOI: 10.7667/PSPC171617

基于故障录波数据同步技术的输电线路参数辨识方法

叶昌荣¹, 冯树海², 徐鹏², 刘俊²

(1. 河海大学, 江苏 南京 211000; 2. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 211106)

摘要: 输电线路多源参数的差异性及其受外部环境影响的易变性使得常规离线测量结果不准确, 利用故障录波信息进行在线参数辨识可以满足实际线路参数需及时更新的要求。该方法基于线路两端故障录波信息, 考虑双端故障录波信息不同步时间, 构建约束方程求解区内外故障时的线路两端数据的不同步时间。在此基础上利用双端同步的电压电流相量, 进行线路参数辨识。通过 IEEE9 节点模型分析验证表明, 该对齐方法的对时精度等级约为 10^{-5} s, 提高了利用故障录波信息进行输电线路参数辨识的有效性。

关键词: 故障录波; 输电线路; 数据对齐; 参数辨识

Transmission line parameter identification method based on fault recorder data synchronization technology

YE Changrong¹, FENG Shuhai², XU Peng², LIU Jun²

(1. Hohai University, Nanjing 211000, China; 2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: The conventional off-line measurement results infected by differences in sources of different parameters and the impact of the external environment are not accurate. The on-line fault parameter identification based on fault recorder information can meet the requirement that the actual line parameters need to be updated in time. Based on the double terminal fault recorder information of the line and considering the asynchronous time of double end fault record information, this paper constructs the constraint equation to solve the asynchronous time data when internal and external faults occur. On the basis of this method, the parameters of the line are identified by using the voltage and current phasor of double terminals. Through the analysis and verification of the IEEE9 node model, it is shown that the time precision of the alignment method is about 10^{-5} s, which improves the effectiveness of fault line information identification for transmission lines by using fault record information.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. DZ71-160014) "Technical Research of Power Grid Branch Parameters Identification based on Time Scale Uniformity Multi-source Data".

Key words: fault recorder; transmission line; data alignment; parameter identification

0 引言

提高输电线路参数准确性对于线路和系统安全运行具有重要的意义。目前输电线路参数辨识主要包括理论计算方法、离线参数测量和在线参数测量方法, 考虑到实际线路参数在投运后会由于环境、线路改造和线路之间的互感等因素影响而改变, 所以在线测量参数的结果更加贴近实际运行线路的参数^[1]。基于 PMU 的在线参数辨识方法是目前效果较

好的辨识手段, 但 PMU 量测设备主要部署在 500 kV 主网架厂站和部分 220 kV 电厂, 而故障录波装置安装更为广泛, 在发电厂、220 kV 及以上变电所和 110 kV 重要变电所均有装设^[2-3]。故障录波信息在故障类型辨识和故障测距方面广泛应用, 却在参数辨识方面的应用较少^[4-6]。故障录波记录的是电网发生故障时线路运行数据, 通常上传的录波信息有双端三相电压电流瞬时值, 包含故障前稳态信息、故障后暂态数据和故障切除后新稳态信息^[7], 利用该部分数据来辨识输电线路的参数具有较高的准确性。

近年来, Roberto Schulze 等人提出了基于故障数据的线路参数辨识方法。该方法具有不依赖硬件

基金项目: 国家电网公司科技项目 (DZ71-160014) “基于时标一致性多源数据的电网支路参数辨识技术研究”

数据同步设备,可以辨识线路的零序参数等优点^[8]。主要利用暂态数据进行研究,采用电压电流的相量在频域内进行计算^[9-10],但该方法在提取工频分量时采用半周傅里叶方法,不能有效滤除暂态非周期分量的影响。同时数据对齐时忽略线路双端电压相角差,将产生计算误差。文献[11]提出了一种基于故障数据的线路分布参数时域辨识方法,并采用LOWESS方法平滑故障信号中的噪声。文献[12]提出了一种基于集中参数模型在时域内进行参数辨识的方法,避免了频域法的一些弊端。文献[13]提出了一种基于故障录波信息的正序参数分布模型测量方法。尽管故障录波信息包含线路运行完整的数据,但是由于全球定位系统(GPS)同步授时的实际应用中,卫星信号的调整、天线受干扰以及GPS接收系统的故障等,都会造成卫星失锁现象,进而致使GPS接收器在短时间内失步^[14]。更重要的是现场很多老旧设备并未安装GPS同步装置。这都会导致双端录波信息的不同步,而以上方法中默认双端故障数据是同步的,没有考虑实际存在的不同步时延问题。文献[15]针对变电站的故障录波数据的同步问题提出了利用双端电气量消去线路参数来构建约束方程求解不同步时间的方法,但是未考虑在参数辨识领域的应用。

本文提出了一种基于故障录波信息的输电线路稳态参数辨识方法,该方法利用录波文件解析得到线路双端的电压、电流基波相量。针对区内、外故障模型建立电气量约束方程求解双端数据不同步时间,利用同步后故障录波信息包含的稳态数据进行基于集中参数模型的输电线路阻抗参数辨识。算例证明了双端数据对时的有效性和参数辨识结果的可用性。

1 基于故障录波信息的参数辨识

1.1 差分傅里叶方法原理

傅氏变换算法^[16]假定被采样信号是一个周期性的时间函数,除基波外还含有不衰减的直流分量和各次谐波。

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [b_n \cos n\omega_1 t + a_n \sin n\omega_1 t] \quad (1)$$

式中: $n=0,1,2,3,\dots$; a_n 和 b_n 分别为各次谐波正弦项和余弦项的振幅; ω_1 为基波角速度。

可采用梯形法求得基波分量的正弦项和余弦项的振幅,在满足精度要求的前提下,采用

$$a_1 = \frac{1}{N} \left[2 \sum_{k=1}^{N-1} x_k \sin k \frac{2\pi}{N} \right] \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \left[2 \sum_{k=1}^{N-1} x_k \cos k \frac{2\pi}{N} \right] \quad (3)$$

式中: a_1 、 b_1 分别为基波分量的正弦项和余弦项的振幅; N 为一个周期的采样点数; x_k 为第 k 次采样值。

因此可求得相应的有效值和相位:

$$2X^2 = a_1^2 + b_1^2 \quad (4)$$

$$\tan \alpha_1 = \frac{b_1}{a_1} \quad (5)$$

傅里叶算法假定被采样信号是周期的,此时可以准确地求出基频分量。而在故障录波信息中一般包含有衰减的直流分量,这会给计算带来一定的误差。故在傅里叶基础上引入差分傅里叶,即用采样值之差 $x(n+1) - x(n)$ 代替 $x(n)$ 输入到原来的数字滤波器中。差分傅里叶可以有效地抑制衰减直流分量。

1.2 双端数据对齐方法

基于差分傅里叶技术对录波数据进行初步处理,得到源于输电线路双端录波器的双端电气量信息。而双端录波信息提供的时间并不是基于同一个时标,我们需要重新将双端的采样数据进行对齐才能用于线路参数辨识。具体的双端数据对齐工作将分为两个部分:粗对齐和细对齐。

1.2.1 粗对齐方法

首先根据线路发生故障的电气量特征,通过相电流突变量检测法^[17]来对双端数据进行粗对齐,将不同步角控制在 0.01 s 之内。相电流突变量:

$$\Delta I_{\phi\phi} = |i_{\phi\phi}(t) - 2i_{\phi\phi}(t-T) + i_{\phi\phi}(t-2T)| \quad (6)$$

给定判据: $|\Delta I_{\phi\phi}| > k_1 \Delta I_{BP} + I_{OD}$ 。

式(6)中: I_{OD} 为固定门槛,按照最大负荷下不平衡电流来取; $\Delta I_{BP} = |i_{\phi\phi}(t-T) - 2i_{\phi\phi}(t-2T) + i_{\phi\phi}(t-3T)|$ 是不平衡电流,为浮动门槛; k_1 取 1.25;

通过该方法可以将双端数据按照故障发生时刻点位进行初步对齐,将双端数据不同步时间控制在 0.01 s 内。

1.2.2 细对齐方法

第二步细对齐为区内故障和区外故障。当录波数据为其它线路发生故障时本线路录波装置启动而记录的数据则称为区外故障。由于发生区外故障可能导致本线路的故障录波设备启动,必须考虑针对该部分信息的数据对齐方案。

当录波数据为本线路发生故障时为区内故障。由于发生区内故障时双端故障录波设备将启动并将录波信息上传至调度主站,该部分数据也是进行线

路参数辨识的主要数据来源。而系统的线路故障大多为单相故障，故本文主要讨论区内单相故障下的录波数据的应用。

1) 区外故障数据：针对区外故障数据，采用如图 1 中的 π 型集中参数模型，构建电压电流的约束方程。约束方程为

$$Y \times (\dot{U}_1 + \dot{U}_2 \times e^{j\theta}) / 2 = \dot{I}_2 \times e^{j\theta} + \dot{I}_1 \quad (7)$$

式中： Y 为输电线路对地导纳矩阵； θ 为线路两侧数据不同步角；1 为线路首端，2 为线路末端。

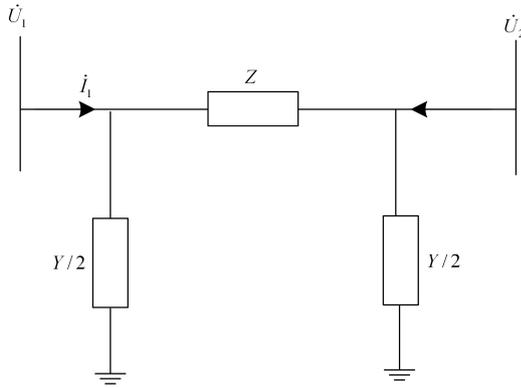


图 1 输电线路集中参数模型

Fig. 1 Lumped parameter model of transmission line

通过选取一组故障前和一组故障后的数据来构建不同步角方程组，消去对地导纳矩阵 Y ，得到不同步角 θ 的一元二次方程。

$$\begin{aligned} & (\dot{I}_2 \times e^{j\theta} + \dot{I}_1)^T \times (\dot{U}_{1p} + \dot{U}_{2p} \times e^{j\theta}) = \\ & (\dot{U}_1 + \dot{U}_2 \times e^{j\theta}) \times (\dot{I}_{2p} \times e^{j\theta} + \dot{I}_{1p}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中： \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 为故障前双端电压电流相量； \dot{I}_{1p} 、 \dot{I}_{2p} 、 \dot{U}_{1p} 、 \dot{U}_{2p} 为故障后双端电压电流相量。

求解该方程后去除包含的伪根即可得所求的不同步角，结合已知的工频频率 f ，即可以求得不同步时间：

$$t_{mn} = \theta / (2 \times \pi \times f) \quad (9)$$

2) 区内故障数据：对区内故障数据，由于故障之后三相线路相应的约束方程不再成立，但是对非故障相该约束方程仍然成立。引入假设：输电线路三相对地导纳相等，且忽略其互导纳。得到关于单端的约束方程，以 A 相为例有：

$$Y_a = (\dot{I}_{2a} \times e^{j\theta} + \dot{I}_{1a}) \times 2 / (\dot{U}_{1a} + \dot{U}_{2a} \times e^{j\theta}) \quad (10)$$

因为对地电导相对比与对地容抗很小，忽略对地电导，则 A 相对地导纳 Y_a 实部为零，即得到方程：

$$\text{Re}[(\dot{I}_{2a} \times e^{j\theta} + \dot{I}_{1a}) \times (\dot{U}_{1a} + \dot{U}_{2a} \times e^{j\theta})] = 0 \quad (11)$$

通过化简可以得到关于不同步角的方程：

$$f(\theta) = x \cos \theta + y \sin \theta + z = 0 \quad (12)$$

式中，未知数 x 、 y 、 z 为 A 相电压电流复数 \dot{U}_{1a} 、 \dot{U}_{2a} 、 \dot{I}_{1a} 、 \dot{I}_{2a} 实虚部的代数组合。求解不同步角 θ 即可得到双端数据的不同步时间。

1.3 基于故障录波的线路参数辨识

故障录波数据基于上述对齐方法处理之后，即可得到某一时刻线路两端的电压与电流，两端电流注入方向如图 1 所示。

该线路首末两端电压电流方程如下：

$$\dot{I}_1 = \left(\frac{Y}{2} + \frac{1}{Z}\right) \dot{U}_1 - \frac{1}{Z} \dot{U}_2 \quad (13)$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{1}{Z} \dot{U}_1 + \left(\frac{Y}{2} + \frac{1}{Z}\right) \dot{U}_2 \quad (14)$$

由此可得：

$$Y/2 = \frac{\dot{I}_1 + \dot{I}_2}{\dot{U}_1 + \dot{U}_2} \quad (15)$$

$$Z = \frac{(\dot{U}_1 + \dot{U}_2)(\dot{U}_1 - \dot{U}_2)}{\dot{U}_2 \dot{I}_1 - \dot{U}_1 \dot{I}_2} \quad (16)$$

由于该方法直接利用双端电气量，计时耗时短，但是容易受到单个时刻量测误差影响而导致辨识结果出现明显波动。所以在对辨识结果进行处理时，通过对多组数据求解线路电抗取期望值。即

$$X_T = \sum_{n=1}^k X_n / k \quad (17)$$

式中： X_T 是电抗期望值； X_n 为采样点第 n 组数据电抗计算值； k 为数据样本数，一般取 100。

在此基础上定义筛选原则

$$\Delta X_n = |X_n - X_T| / X_T \quad (18)$$

式中： X_T 是电抗期望值； X_n 为采样点第 n 组数据电抗计算值。

当 $\Delta X_n > 0.1$ 时，将该电抗计算值剔除。对其余电抗计算值重新取期望 X_T ，即为最终的电抗辨识值。

1.4 算法流程图

基于故障录波信息的线路参数辨识流程图如图 2 所示。当需辨识线路 L1 参数时，首先获取线路 L1 双端的子站录波文件。如果获取成功则利用双端录波数据进行参数辨识。当同时保存有区内、外录波文件时，由于区外故障没有忽略对地电导带来的误差，优先采用对齐精度较高的区外故障数据进行线路参数辨识。如果不存在该线路双端录波文件，则考虑该时段是否有 PMU 装置提供参数辨识数据。

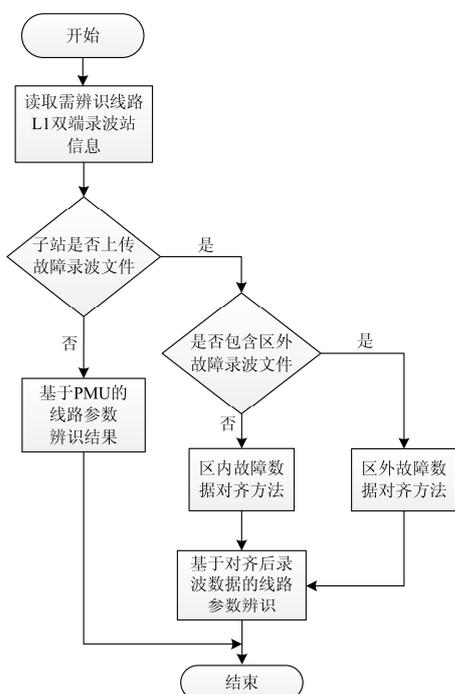


图 2 基于故障录波信息的参数辨识流程图

Fig. 2 Flow chart of parameter identification based on fault recorder information

2 算例仿真与分析

2.1 测试算例

如图 3 所示, 本文选用 IEEE9 节点模型为测试算例, 在 Matlab2010b 版本的 Simulink 上搭建该模型, 模型参照实际录波设备的高速采样频率 5 000 Hz 进行离散采样。在该组数据的基础上, 测试本文所

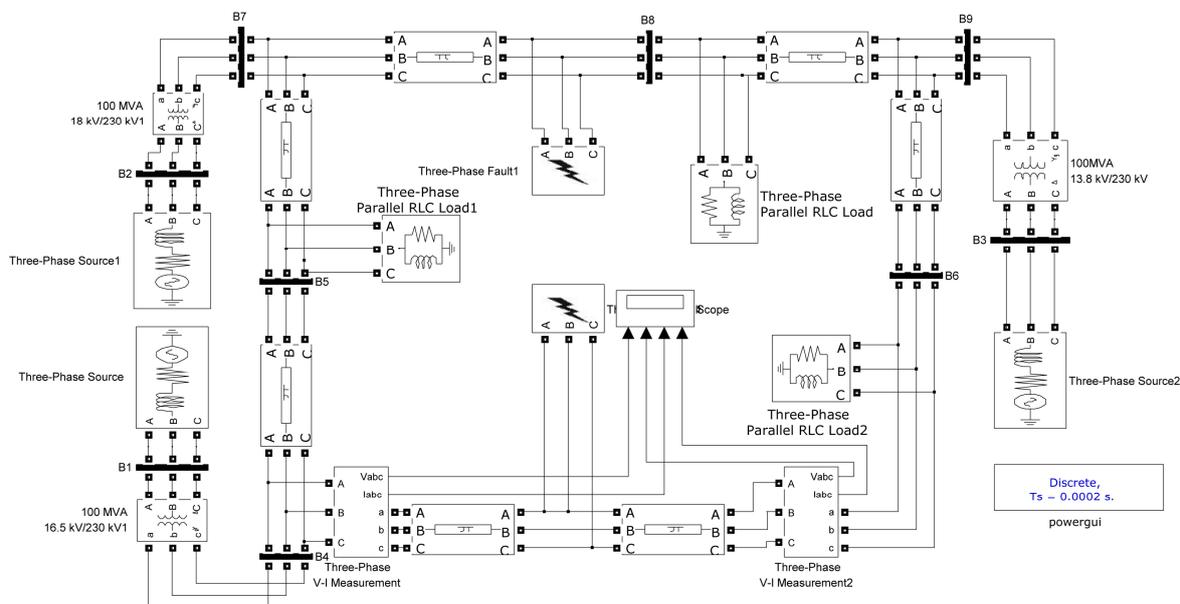


图 3 IEEE9 节点标准算例模型图

Fig. 3 Standard example model diagram of IEEE9 node

提针对双端故障录波数据的对齐方法, 同时分析故障录波数据对参数辨识结果要求精度的适用性。

2.2 双端录波数据粗对齐效果测试

人为给定双端数据不同步偏差并单相接地故障, 利用相电流突变量检测法减小双端数据不同步偏差, 结果见图 4。由图 4 波形曲线知, 该粗对齐方法虽然并未完全消除双端数据不同步偏差, 但是有效的将不同步偏差缩小了, 有利于精对齐方法的应用。

2.3 双端录波数据细对齐效果测试

如前文 1.2 节中的分析, 双端数据对齐将分为区内、外故障两部分来进行测试。人为给定双端数据不同步偏差范围为 $[-0.006 \text{ s}, 0.006 \text{ s}]$, 观察实际计算时间偏差与设定值的差异, 结果见表 1。通过观察表 1 结果, 针对区内故障结果虽然该方法由于忽略了对地电纳的存在导致存在级数为 10^{-5} s 的误差, 但是与初始给定误差相比该对齐结果切实有效地减小了双端数据的不同步时间。考虑实际采样偏差, 该精度可以满足现有大部分故障录波信息的对齐要求。

同时表 1 中还给出了发生区外故障时利用本线路故障录波信息进行双端数据对齐的结果。在故障录波设备普遍电气量精度为 0.000 2 s 的基础上, 同时考虑到双端数据在实际获取时的时延不确定性, 通过该方法对故障录波信息进行对齐后精度为 10^{-5} s 。可以满足现有故障录波设备在该精度下的数据对齐要求, 并且由于区外故障没有忽略对地电纳使得其对齐精度高于区内故障。

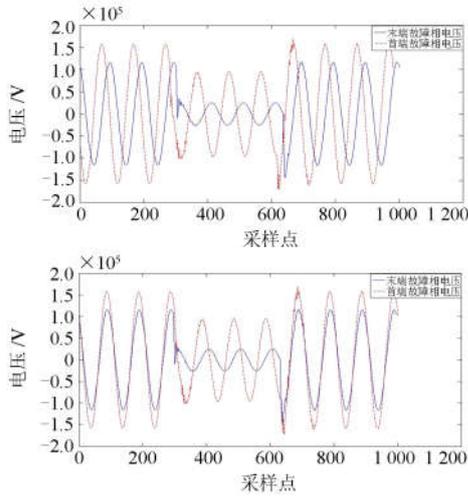


图 4 双端数据粗对齐对比图

Fig. 4 Simple alignment of double ended data

表 1 故障录波信息双端数据对齐结果

Table 1 Double ended data alignment results for fault recording information

不同步时间 给定值 T/s	计算值 t/s		绝对误差 $\Delta t/s$		相对误差 $\Delta T_0/p.u.$	
	区内故障	区外故障	区内故障	区外故障	区内故障	区外故障
0.0060	0.00604918	0.00603284	4.9108E-05	3.5284E-05	0.24554001	0.17641989
0.0040	0.00405022	0.00401188	5.0228E-05	1.5188E-05	0.25114226	0.07594108
0.0010	0.00105667	0.00100487	5.6666E-05	4.8678E-07	0.28333283	0.00243392
0.0006	0.00065774	0.00060234	5.7785E-05	2.2336E-06	0.28891755	0.01116835
0.0002	0.00025870	0.00020752	5.8770E-05	7.5163E-07	0.29385231	0.00375813
0.0000	0.00005934	1.0170E-07	5.9314E-05	1.0170E-07	0.29657402	0.00050858
-0.0002	-0.0001459	-0.0001996	5.9841E-05	3.8170E-07	0.29920625	0.00190856
-0.0004	-0.0003396	-0.0003990	6.0304E-05	9.0286E-07	0.30152125	0.00451437
-0.0010	-0.0009335	-0.0009989	6.2364E-05	1.0241E-06	0.31182262	0.00512059
-0.0040	-0.0039479	-0.0039924	5.2025E-05	7.5107E-06	0.26012943	0.03755354
-0.0060	-0.0059486	-0.0059867	5.5114E-05	1.3201E-05	0.27556416	0.06600563

样精度最高约为 5 000 Hz, 数据对齐精度为 0.06 ms 左右。此时电抗参数辨识值约为 51.923 Ω , 相对电抗真值误差为 6.68%。该方法有效减小了双端数据的不同步时间, 提高了故障录波数据的辨识精度。并且得出结论: 想要获取误差为 1% 的电抗参数, 要求进行辨识的数据源精度需在 0.002 ms 左右。

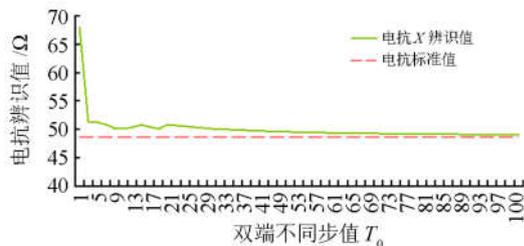


图 5 线路电抗辨识精度分析

Fig. 5 Accuracy analysis of line reactance identification

仿真结果表明, 在 IEEE9 节点的系统发生区内、外故障时, 利用双端的故障录波信息足够进行线路参数辨识。但是考虑到数据源的精度, 故障发生后的电气量波动和部分假设带来的误差, 该方法对齐精度大约为 10^{-5} s 左右。该方法可以有效地减小主站获取的子站录波信息存在的两端数据不同步问题。

2.4 线路电抗辨识的数据精度分析

在该 IEEE9 节点模型中, 选取正常运行数据进行参数辨识。由模型参数设定可知该线路电抗约为 48.669 Ω , 随后给两端数据设置 $\Delta t = 0.0002/T_0$ s 的不同步时间。设定 T_0 取值范围为 [1, 100], 得到不同步时间对线路电抗辨识结果的影响。

由图 5 结果可知, 利用单时刻数据进行电抗辨识, 当双端不同步角在 0.002 ms 时该辨识值误差约为 1%。考虑前文分析检验得出的故障录波数据采

3 结论

本文提出了一种利用故障录波进行输电线路参数辨识的新思路。仿真实验表明, 该方法的对齐结果精度可以适应现有故障录波设备精度的对齐要求。该方法不需要增加额外设备即可实现对录波数据的对齐处理, 有效提高了故障录波信息的直观性和准确性及应用于输电线路参数辨识的有效性。但是并没有考虑到对包含变压器的支路参数辨识问题, 这也是下一阶段的研究课题。

参考文献

- [1] 丁蓝, 欧智乐, 汤致凯, 等. 输电线路参数辨识的影响因素研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1948-1953.
DING Lan, OU Zhile, TANG Zhikai, et al. Research on factors influencing identification of transmission line parameters[J]. Power System Technology, 2013, 37(7):

- 1948-1953.
- [2] 童晓阳, 王睿晗, 王洪彬, 等. 基于有限 PMU 的电网故障在线识别算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 49-55.
TONG Xiaoyang, WANG Ruihan, WANG Hongbin, et al. Online detection algorithm of power system fault using limited PMUs[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 49-55.
- [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.
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.
- [4] 胡志坚, 刘美观, 张承学, 等. 互感线路参数带电测量研究与实现[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 32-35.
HU Zhijian, LIU Meiguan, ZHANG Chengxue, et al. Principles and realization of live line measurement to parameters of transmission lines with mutual inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(24): 32-35.
- [5] 王海港, 谢民, 孙月琴, 等. 输电线路双端故障测距时域算法实用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 142-147.
WANG Haigang, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Practical study on transmission line two terminal time-domain fault location method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 142-147.
- [6] REHTANZ C, BERTSCH J. Wide area measurement and protection system for emergency voltage stability control[C] // 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 27-31, 2002, New York, USA: 842-847.
- [7] 陈昊琳, 张国庆, 郭志忠. 故障录波器发展历程及现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 148-152.
CHEN Haolin, ZHANG Guoqing, GUO Zhizhong. Development and present situation analysis of fault recorder[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 148-152.
- [8] ZIVANOVIC R. Estimation of transmission line parameters using fault records[D]. Canada: Victoria University, 2006.
- [9] SCHULZE R, SCHEGNER P, STACHEL P. Parameter identification of unsymmetrical transmission lines using accurately re-synchronised fault records[C] // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Canada: 1-6.
unsymmetrical transmission lines[C] // 2009 IEEE Bucharest PowerTech, June 28-July 2, 2009, Bucharest, Romania: 1-7.
- [11] 姜杰, 郭威, 黄文兴, 等. 基于故障数据的线路分布参数时域辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 7-12.
JIANG Jie, GUO Wei, HUANG Wenxing, et al. Distributed parameter time domain identification method of transmission lines based on fault records[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 7-12.
- [12] SCHULZE R, SCHEGNER P, ZIVANOVIC R. Parameter identification of unsymmetrical transmission lines using fault records obtained from protective relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1265-1272.
- [13] 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. On-line parameter measurement of double circuit transmission lines based on fault circuit[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 138-142.
- [14] 黄翔, 江道灼. GPS 同步时钟的高精度守时方案[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 74-77.
HUANG Xiang, JIANG Daozhuo. A high accuracy time keeping scheme based on GPS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 74-77.
- [15] 王海港, 黄太贵, 孙月琴, 等. 多变电站故障录波数据同步自动化方法与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 102-107.
WANG Haigang, HUANG Taigui, SUN Yueqin, et al. Auto synchronization method and its implementation of fault recorder data from multi-substations[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 102-107.
- [16] 刘毅, 温渤婴. 差分与傅氏变换相结合算法在微机电流保护中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2000, 28(8): 36-38.
LIU Yi, WEN Boying. Applying the algorithm of FFT with difference data in microprocessor based current protection[J]. Power System Protection and Control, 2000, 28(8): 36-38.
- [17] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
-
- 收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2017-12-23
作者简介:
叶昌荣(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为状态估计及参数辨识. E-mail: yechangrong@hhu.edu.cn
(编辑 张爱琴)