

含 T 接线互感线路参数带电测量方法及工程应用

方丽华¹, 胡志坚²

(1. 广东电网公司 中山供电局, 广东省 中山市 528400;

2. 武汉大学 电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072)

A New Method for Live Line Measurement of Zero-Sequence Parameters of Transmission Line Containing T-Connection Transmission Line With Mutual Inductance and Its Engineering Application

FANG Li-hua¹, HU Zhi-jian²

(1. Zhongshan Power Supply Bureau, Zhongshan 528400, Guangdong Province, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: A new method for live line measurement of zero-sequence parameters for transmission line containing T-connection line with mutual inductance is proposed. The principle and mathematical model of the proposed method are presented in detail, and the operation mode of transmission line with mutual inductance during live line measurement is given. There are two key techniques in the proposed method, i.e., to acquire the zero-sequence current to be measured and to use Global Positioning System (GPS) as the synchronous signal for the measurement carried out at different place simultaneously. In this paper, the composition of live line measuring device and digital simulation results are given. Finally, the live line measurement process of two 110kV transmission line containing T-connection lines with mutual inductance, which belong to Zhongshan power network in Guangdong province, China, by the proposed method are described, the live line measurement results are given and compared with the measured results by interference method and the value from empirical estimation. Results from both simulation and on-site live line measurement show that the proposed live line measurement method is feasible, and its measurement accuracy can satisfactorily meet the requirements of engineering measurement.

KEY WORDS: global positioning system (GPS); transmission lines with mutual inductance; T-connection line; zero sequence impedance; live line measurement

摘要: 提出一种含 T 接线互感线路的零序阻抗参数带电测量新方法。详细介绍了该带电测量方法的原理与数学模型, 给出了带电测量时互感线路的运行方式。获取测量源与利用全球卫星定位系统(GPS)作为异地测量的同步信号是 2 个关键技术。文中给出了带电测量装置的构成以及数字仿真结果。最后介绍了利用新方法对广东中山电网 2 条 110kV 含

T 接线互感线路的零序阻抗参数进行带电测量的情况, 给出了带电测量结果, 并与干扰法测量值以及经验估算值进行了对比。数字仿真结果与实测结果均表明该带电测量方法是可行的, 测量结果准确, 完全能满足工程测量要求。

关键词: 全球定位系统; 互感线路; T 接线; 零序阻抗; 带电测量

0 引言

随着电力系统规模的扩大, 发电厂(变电站)出线增多, 特别是在 110kV 电压等级的线路中, 含 T 接线的互感线路越来越多。含 T 型接线互感线路的零序阻抗会影响到线路故障状态, 特别是影响零序电流的大小, 对零序电流保护影响极大^[1-4]。由于含 T 接线互感线路的零序阻抗受到线路走向、零序电流流经区域的接地电阻率等很多因素的影响, 理论计算值无法满足继电保护整定值计算的精度要求, 若采用计算值作为整定计算的依据, 会使保护在系统故障时产生拒动或误动, 这直接威胁到系统的安全与稳定运行。

传统的确定输电线路零序参数的方法有公式计算法^[5]和停电测量法^[6-7]。由于理论计算公式中涉及到大地电阻率等不确切参数, 因此理论计算公式的计算结果是不准确的。因此, 继电保护整定规定指出: 架空线路和电缆的零序阻抗、其它对继电保护影响较大的参数应使用实测值^[8]。

传统测量方法测量互感线路参数要求被测线路完全停电; 另外, 按传统停电方式, 在较广的地域进行测量, 其工作量大, 测量的同时性也不可能

保证^[9]。文献[10]和[11]提出了带电测量互感线路零序参数的方法，解决了输电线路参数带电测量的难题，但该方法不适合含 T 接线互感线路零序阻抗参数的带电测量。

本文将提出一种含 T 接线互感线路的零序阻抗参数带电测量新方法，该方法已成功应用于广东中山 110kV 电网含 T 接线互感线路参数的带电测量中，实测结果证明了本文所提带电测量新方法完全可以满足电力系统含 T 接线互感线路零序阻抗参数带电测量的需要。

1 带电测量方法及其数学模型

1.1 线路模型

含 T 接线的 2 条互感线路的线路模型如图 1 所示。图中： Z_1 为第 1 条线路的零序自阻抗； Z_{21} 、 Z_{22} 和 Z_{23} 分别为第 2 条 T 线路第 1、2、3 支路的零序自阻抗； Z_{121} 和 Z_{122} 分别为第 1 条线路与第 2 条 T 线路的第 1 支路和第 2 支路之间的零序互阻抗；第 1 条线路与第 2 条 T 线路的第 3 支路之间零序互阻抗为零； \dot{I}_1 和 \dot{I}_{1p} 分别为第 1 条线路首末两端的零序电流相量； \dot{I}_{21} 、 \dot{I}_{22} 和 \dot{I}_{23} 分别为第 2 条含 T 接线线路的第 1、2、3 支路的零序电流相量，并且有 $\dot{I}_{21} = \dot{I}_{22} + \dot{I}_{23}$ ； \dot{U}_1 和 \dot{U}_{1p} 分别为第 1 条线路的首末两端的零序电压相量； \dot{U}_2 、 \dot{U}_{2p} 和 \dot{U}_3 分别为第 2 条 T 线路的第 1、2、3 支路端点处的零序电压相量。

列写此含 T 接线互感线路的代数方程组为

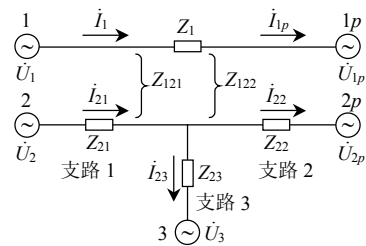


图 1 含 T 接线互感线路模型

Fig. 1 The model of a multi-terminal transmission line with mutual inductance

$$\begin{cases} \dot{U}_1 - \dot{U}_{1p} = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_{21} Z_{121} + \dot{I}_{22} Z_{122} \\ \dot{U}_2 - \dot{U}_{2p} = \dot{I}_{21} Z_{21} + \dot{I}_{22} Z_{22} + \dot{I}_1 Z_{121} + \dot{I}_1 Z_{122} \end{cases} \quad (1)$$

$$\dot{U}_2 - \dot{U}_3 = \dot{I}_1 Z_{121} + \dot{I}_{21} Z_{21} + \dot{I}_{23} Z_{23} \quad (2)$$

1.2 带电测量用的零序电流获取方法

通过线路上的继电保护装置断开带电运行的互感线路的某一线路或某一支路的单相开关，造成缺相运行，由负荷电流供给测量用的零序电流，0.5~1s 后，再通过互感线路上的自动重合闸恢复线路正常运行的方法，来产生供带电测量用的零序大电流^[10-11]；或者采用将带电运行的含 T 接线互感线路某一线路停电，再外加零序电压的方法，来产生供带电测量用的零序大电流。

进行带电测量时，含 T 接线互感线路运行方式^[12]如表 1 所示。表中的“停电加压”是指将该支路三相短接后加压，“停电”指将该支路三相短接后接地。这些运行方式下获取的测量数据是独立的，可根据测量需要灵活选取。

表 1 带电测量时互感线路的运行方式

Tab. 1 The independent measurement cases for live line measurement

运行方式	线路 1	含 T 接线线路 2		
		支路 1	支路 2	支路 3
1	带电运行	单相跳闸，0.5~1.0s 后重合闸	带电运行	带电运行
2	带电运行	带电运行	单相跳闸，0.5~1.0s 后重合闸	带电运行
3	带电运行	带电运行	带电运行	单相跳闸，0.5~1.0s 后重合闸
4	单相跳闸，0.5~1.0s 后重合闸	带电运行	带电运行	带电运行
5	停电加压	带电运行	带电运行	带电运行
6	带电运行	停电加压	停电	停电
7	带电运行	停电	停电加压	停电
8	带电运行	停电	停电	停电加压

1.3 异地测量信号的同步采样

利用全球卫星定位系统(global positioning system, GPS)的授时功能获得误差小于 1 μs 的时间基准^[10-11]，在 GPS 时间同步下，分布在各测量点的同步采集装置同时采集零序电流注入系统后含 T 接线的互感线路中各线路和支路的零序电流，以及各线路和支路两端的零序电压，存入同步采集装置中。

1.4 零序阻抗计算方法

对同步采集装置采集的各零序电流和零序电压，采用傅立叶算法来得到相应的零序电流相量值和零序电压相量值^[12]。分 2 步来计算 6 个未知参数 Z_1 、 Z_{21} 、 Z_{22} 、 Z_{23} 、 Z_{121} 、 Z_{122} 。首先计算其中的 5 个未知参数 Z_1 、 Z_{21} 、 Z_{22} 、 Z_{121} 、 Z_{122} ，再计算 Z_{23} 、 Z_{121} ；并对 2 次计算出的 Z_{21} 、 Z_{121} 取平均值。

线路 1 与线路 2 之间的互阻抗为 $Z_{121} + Z_{121}$ 。

对于代数方程组(1), 按表 1 中任一种运行方式产生采样数据, 得到 2 个独立方程; 再按表 1 中其它任何 2 种或 2 种以上的运行方式产生采样数据, 得到 4 个或 4 个以上的独立方程。这样至少得到 6 个独立的方程, 采用最小二乘法^[13-14], 解出 5 个未知的零序参数 Z_1 、 Z_{21} 、 Z_{22} 、 Z_{121} 、 Z_{122} :

$$\hat{\mathbf{Z}} = (\mathbf{I}^T \mathbf{I})^{-1} \mathbf{I}^T \mathbf{U} \quad (3)$$

式中

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1^1 & 0 & 0 & \dot{I}_{21}^1 & \dot{I}_{22}^1 \\ 0 & \dot{I}_{21}^1 & \dot{I}_{22}^1 & \dot{I}_1^1 & \dot{I}_1^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{I}_1^p & 0 & 0 & \dot{I}_{21}^p & \dot{I}_{22}^p \\ 0 & \dot{I}_{21}^p & \dot{I}_{22}^p & \dot{I}_1^p & \dot{I}_1^p \end{bmatrix}_{(2 \times p) \times 5}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1^1 - \dot{U}_{1p}^1 \\ \dot{U}_2^1 - \dot{U}_{2p}^1 \\ \vdots \\ \dot{U}_1^p - \dot{U}_{1p}^p \\ \dot{U}_2^p - \dot{U}_{2p}^p \end{bmatrix}_{(2 \times p) \times 1}, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_{21} \\ Z_{22} \\ Z_{121} \\ Z_{122} \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$

在式(3)的矩阵 \mathbf{I} 和 \mathbf{U} 的各元素中, 各零序电流和零序电压相量的上标 p 为独立测量次数, 即表 1 中给出的互感线路带电测量运行方式, 其中 $p \geq 3$, 下标为含 T 接线互感线路的支路编号。

对于代数方程组(2), 按表 1 中任一种运行方式产生采样数据, 得到 2 个独立方程; 再按表 1 中其它任何 1 种或 1 种以上的运行方式产生采样数据, 得到 2 个或 2 个以上的独立方程。这样至少得到 4 个独立的方程, 采用最小二乘法, 解出 3 个未知的零序参数 Z_{21} 、 Z_{22} 、 Z_{121} :

$$\hat{\mathbf{Z}} = (\mathbf{I}^T \mathbf{I})^{-1} \mathbf{I}^T \mathbf{U} \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{21}^1 & \dot{I}_{23}^1 & \dot{I}_1^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{I}_{21}^p & \dot{I}_{23}^p & \dot{I}_1^p \end{bmatrix}_{p \times 3}$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_2^1 - \dot{U}_3^1 \\ \vdots \\ \dot{U}_2^p - \dot{U}_3^p \end{bmatrix}_{p \times 1}, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{21} \\ Z_{23} \\ Z_{121} \end{bmatrix}_{3 \times 1}$$

式(4)中各参数的说明与式(3)相同。

采用与本文类似的方法, 可以推导出 2 条以上含 T 型接线互感线路和含多个 T 型接线互感线路零序阻抗参数带电测量的数学模型与计算方法。

2 数字仿真

为检验本文所提带电测量方法的正确性, 进行了数字仿真计算。2 条互感线路 1 和线路 2, 其中线路 2 含 T 接线, 其零序阻抗参数如表 2 所示。

表 2 2 条含 T 接线互感线路的相关参数
Tab. 2 The parameters of two multi-terminal lines

参数	线路 1	含 T 接线的线路 2		
		支路 1	支路 2	支路 3
长度/km	50	25	15	30
零序 $r/(\Omega/\text{km})$	$r_1 = 0.2671$	$r_{21} = 0.2671$	$r_{22} = 0.2671$	$r_{23} = 0.2671$
自阻抗 $L/(\text{mH}/\text{km})$	$L_1 = 3.459$	$L_{21} = 3.459$	$L_{22} = 3.459$	$L_{23} = 3.459$
零序 $r/(\Omega/\text{km})$	—	$r_{121} = 0.1418$	$r_{122} = 0.1418$	—
互阻抗 $L/(\text{mH}/\text{km})$	—	$L_{121} = 1.715$	$L_{122} = 1.715$	—

数据采样率为 80 点/周期的仿真计算结果如表 3 所示。从表 3 可以看出, 本文提出的带电测量方法原理正确, 测量结果准确, 具有应用价值。

表 3 数字仿真结果
Tab. 3 Digital simulation results

阻抗参数	设定值/ Ω	仿真计算值/ Ω	相对误差/%
Z_1	$13.355 + j54.318$	$13.421 + j54.522$	0.38
Z_{21}	$6.678 + j27.175$	$6.698 + j27.297$	0.45
Z_{22}	$4.007 + j16.305$	$4.015 + j16.360$	0.34
Z_{23}	$8.013 + j34.023$	$8.034 + j32.754$	0.44
Z_{121}	$3.545 + j13.477$	$3.564 + j13.535$	0.43
Z_{122}	$2.127 + j8.074$	$2.162 + j8.122$	0.66

3 带电测量系统的硬件组成

带电测量系统的硬件构成如图 2 所示。

带电测量系统装置部分采用了基于虚拟仪器与嵌入式系统的设计方法。装置由 GPS 天线及 OEM 板、信号输入接线端子、信号变送器、嵌入式 DSP 同步数据采集卡、开出量卡、继电器组、继电器输出接口、嵌入式 PC 卡、电源卡、电源信号总线底板、液晶显示器、硬盘、键盘和鼠标构成^[12]。

测量的电压信号(经 TV)和电流信号(经 TA)分别经信号输入接线端子、信号变送器接入到嵌入式 DSP 同步数据采集卡。OEM 板输出的 PPS 信号进入到嵌入式 DSP 同步数据采集卡中的 DSP 中断口。OEM 板输出的 GPS 时间信息输入到嵌入式 PC 卡上的串行口中; DSP 卡采集的数据由嵌入式 PC 卡读取并存入硬盘中。嵌入式 PC 卡发出的跳闸和合闸命令经开出量卡、继电器输出接口与输电线路的断路器(开关)连接; 嵌入式 PC 卡与开出量卡和继电器组中的其余继电器连接, 用于切换信号变送器输入信号的档位大小。硬盘中保存的测量数据由嵌入式 PC 卡经以太网送至中心计算机中, 供含 T 型接线互感线路零序参数带电测量计算软件使用。

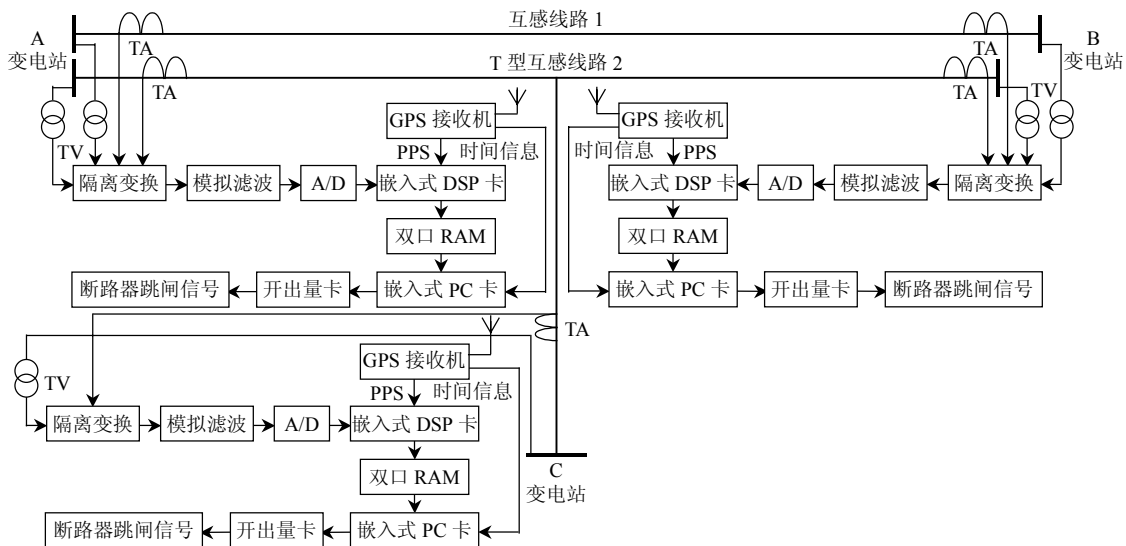


图 2 带电测量系统的硬件构成

Fig. 2 The hardware structure of the live line measurement system

4 带电测量实例

中山电网含 T 接线互感线路示意图见图 3。图中各线路均为 110kV 线路，各线路与支路长度如图 3 所示。同海甲线与同海乙线为同塔双回线，同海甲线上有一个 T 接线的永宁支路。进行带电测量时，利用所用变提供测量用的零序电流。在停电的线路上加上零序电压的测量接线见图 4。

本次带电测量采取同海甲线与同海乙线轮流停电进行加压的方法来进行，采用表 1 中线路的带电运行方式 5、6、7、8。为了使有互感耦合的运行线路上的零序电压与零序电流有足够大的变化，本次测量时，在停电线路路上所加的零序电流在 100 A 以上，以提高测量数据的准确度。另外，为减低加

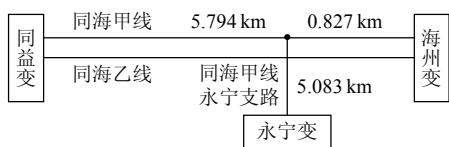


图 3 中山电网含 T 接线互感线路示意图

Fig. 3 Diagram of multi-terminal lines in Zhongshan grid

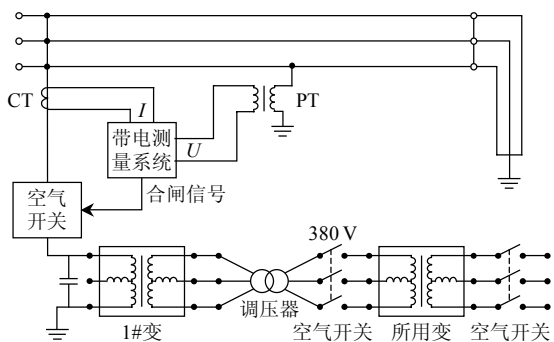


图 4 测量互感时加压线路的测量接线图

Fig. 4 Wiring diagram of a transmission line with an external source

压设备的容量，采取了在加压线路上并联电容器进行补偿，使容抗与线路的感抗基本一致，以增大测量用零序电流。

同海甲线停电加压、同海乙线带电运行时，在同海甲线上实测的电压波形(局部)和电流波形(局部)分别如图 5、6 所示。

利用研制的带电测量系统，采用本文提出的带电测量方法进行带电测量，结果如表 4 所示。

为验证测量结果的准确性，同时采用干扰法^[15]进行了对比测试。用干扰法测量出的同海乙线自阻

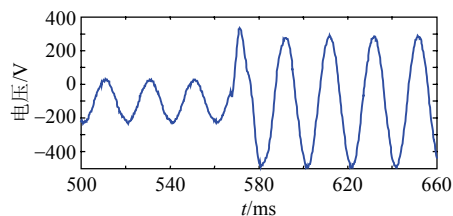


图 5 互感测量加压线路电压波形

Fig. 5 Voltage curve of a line with an external source

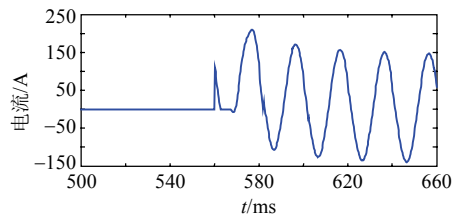


图 6 互感测量加压线路电流波形

Fig. 6 Current curve of a line with an external source

表 4 带电测量结果

Tab. 4 Live line measurement results

零序参数	带电测量结果
同海甲线自阻抗/ Ω	1.702+j7.394
同海乙线自阻抗/ Ω	1.748+j7.446
同海甲线永宁支路自阻抗/ Ω	1.307+j5.676
同海甲线、乙线间互阻抗/ Ω	0.874+j3.598

抗的结果为 $1.694+j7.423\ \Omega$ 。与干扰法测量结果对比可知, 带电测量结果是准确可信的。

中山供电局继电保护科在综合理论计算值^[5]与其它相似线路实测结果的基础上, 得出的同海甲线永宁支路自阻抗的经验估算值为 $1.84+j5.34\ \Omega$, 以此作为保护整定计算的依据。经比较, 经验估算值与带电测量结果在电抗值上的相对误差为 5.91%, 阻抗值上的相对误差为 3.12%。

由此可见, 经验估算值与实际测量值之间还是存在一定的误差。这是因为经验估算值是建立在理论计算结果与其它线路的实测结果的基础之上, 而理论计算本身就存在很大的误差, 其它线路的测量结果也不可完全照搬过来。因此, 为了得到准确的结果, 对线路参数进行实测是最好的选择。

5 结语

本文提出的含 T 接线互感线路零序阻抗参数带电测量方法以及研制的带电测量系统, 经过了中山电网 110 kV 含 T 接线互感线路零序参数带电测量的检验, 证明是正确可行的, 测量结果完全满足工程要求。

该方法及测量系统除了可用于含 T 接线互感线路零序参数的带电测量外, 也完全适用于含 T 接线互感线路停电时的零序参数测量。

参考文献

- [1] 李胜芳, 范春菊, 郁惟辅. T 型支接线线路的自适应故障测距算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 59-64.
Li Shengfang, Fan Chunju, Yu Weiyong. Adaptive fault location method for three-terminal transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 59-64(in Chinese).
- [2] 束洪春, 高峰, 陈学允, 等. T 型输电系统故障测距算法研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(6): 28-33.
Shu Hongchun, Gao Feng, Chen Xueyun, et al. A study on accurate fault location algorithm of EHV T-connection to three terminals[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(6): 28-33(in Chinese).
- [3] Funabashi T, Otoguro H, Mizuma Y. Fault location for high resistance grounded transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(1): 80-85.
- [4] Xia Y Q, David A K, Li K K. High-resistance faults on a multi-terminal lines: analysis, simulated studies and an adaptive distance relaying scheme[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(1): 492-500.
- [5] 傅知兰. 电力系统电气设备选择与实用计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [6] 李建国, 朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.

- [7] 刘遵义, 卢明, 吕中宾, 等. 特高压交流输电线路工频参数测量技术及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(10): 59-62.
Liu Zunyi, Lu Ming, Lü Zhongbin, et al. Power frequency parameter measurement technology for UHV transmission lines and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(10): 59-62(in Chinese).
- [8] 李澍森, 陈晓燕, 戚革庆, 等. 同塔四回输电线路参数带电测量[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 17-20.
Li Shusen, Chen Xiaoyan, Qi Geqing, et al. Discussion on live line measurement of the parameters of the transmission lines with four-circuit on a tower[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 17-20(in Chinese).
- [9] 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): 76-79.
Hu Ning, Hu Zhijian, Zheng Gang. Live line parameters measurement of transmission lines with mutual inductance based on GPS technology and integral equations[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 76-79(in Chinese).
- [10] 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 Electrical Power Systems, 1999, 23(24): 32-35(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 胡志坚. 一种含 T 型接线互感线路零序阻抗参数带电测量方法及装置: 中国, 200710053527.0[P]. 2008.
- [13] 薛志英, 梁志瑞. 互感线路零序参数在线测量中的参数估计[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 954-959.
Xue Zhiying, Liang Zhirui. Parameters estimation for zero-sequence parameter on-line measurement of transmission lines with mutual inductance[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 954-959(in Chinese).
- [14] Hu Zhijian, Chen Yunping. New method of live line measuring the inductance parameters of transmission lines based on GPS technology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1288-1295.
- [15] 洪珠琴, 章碧波, 金涌涛, 等. 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, 41.
Hong Zhuqin, Zhang Bibo, Jin Yongtao, et al. Study and realization of zero-sequence parameters interference of overhead transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 35-37, 41(in Chinese).



方丽华

收稿日期: 2009-08-26。

作者简介:

方丽华(1963—), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 从事电力系统科技管理工作;

胡志坚(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统稳定控制与自动化方面的研究工作, E-mail: zhijian_hu@163.com。

(责任编辑 李兰欣)