

基于积分方程的互感线路参数带电测量研究

胡宁¹, 郑罡¹, 胡志坚²

(1. 岳阳市电业局, 湖南 岳阳 414000; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 首先简要回顾了通常得到输电线路参数的三种方法, 然后在增量法的基础上提出了基于 GPS 和积分方程的互感线路参数带电测量的新方法——积分法。该方法是将互感线路的伏安特性方程转化为积分形式, 并采用了最小二乘法求解方程组, 同时得出各线路的零序自阻抗及线路间的零序互阻抗。文中给出了详细的数学模型和数字仿真结果以及软件算法流程图, 介绍了模拟实验过程, 并将积分法与增量法的计算结果进行对比, 结果表明积分法的测量结果是精确可信的。与增量法相比, 该方法具有一定的滤波作用, 一定程度上可以抑制高频分量, 进行测量时一般不需额外提供测量用电源, 方式更为省时省力。

关键词: 电力系统; 互感参数; 带电测量; 积分方程; GPS

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)16-0022-04

0 引言

现代电力系统已经日趋庞大, 电网输电线路走廊也日益狭窄, 多回不共端输电线路平行架设的情况已在我国各大电网中出现, 这也就造成了电网中的互感线路越来越多。通常得到输电线路参数的方法有三种: ①根据架空输电线的结构、材料、气温、环境等情况把具体的参量逐项代入计算公式得到^[1], 称为精确计算; ②从手册或产品目录中查得单位长度线路, 称为近似计算; ③通过现场实际测量得到^[2]。线路参数的带电测量中主要难点为零序互感参数的测量, 以前的测量方法存在零序互感参数带电测量无法实现和精度差的问题。因此寻求新的带电测量输电线路参数的理论及实现方法, 具有重要的理论和实际意义^[3]。本文提出了基于积分方程的互感线路参数带电测量的新方法, 并对其进行了仿真和实验验证。

1 基于积分方程的互感线路参数带电测量的基本原理

设有 n 条互感线路, 编号分别为: $1, 2, \dots, n$ 。互感线路的伏安特性可表示为:

$$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1i} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2i} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i1} & z_{i2} & \dots & z_{ii} & \dots & z_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{ni} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{或 } ZI = U \quad (2)$$

式中: Z 为阻抗矩阵, 其中元素 $z_{ii} = r_{ii} + jx_{ii}$, ($i = 1, 2, \dots, n$) 为第 i 条线路的自阻抗, 包括电阻和电抗两部分。 $z_{ij} = r_{ij} + jx_{ij}$, ($i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$) 为线路 i j

之间的互阻抗。 I 为线路的零序电流相量, U 为线路的零序电压相量。

采用微分方程的形式表示为:

$$\begin{cases} u''_1 - u'_1 = i_1 R_{11} + L_{11} \frac{di_1}{dt} + \dots + i_n R_{1n} + L_{1n} \frac{di_n}{dt} = u_1 \\ u''_2 - u'_2 = i_1 R_{12} + L_{12} \frac{di_1}{dt} + \dots + i_n R_{2n} + L_{2n} \frac{di_n}{dt} = u_2 \\ \vdots \\ u''_n - u'_n = i_1 R_{1n} + L_{1n} \frac{di_1}{dt} + \dots + i_n R_{nn} + L_{nn} \frac{di_n}{dt} = u_n \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_k ($k = 1, 2, \dots, n$) 为各条线路零序电流瞬时值, $u_k = u''_k - u'_k$ ($k = 1, 2, \dots, n$), 其中, u_k ($k = 1, 2, \dots, n$) 为各条线路零序电压的瞬时值, u''_k, u'_k ($k = 1, 2, \dots, n$) 分别为各条线路两端的零序电压瞬时值。在 GPS 时间同步下, 分布在各采样点的同步采样装置同时采集上述的电压、电流。

将上式左右两边积分可得:

$$\begin{cases} \int_{t_k}^{t_{k+1}} u_1 dt = \int_{t_k}^{t_{k+1}} i_1 R_{11} dt + L_{11} [i_1(t_{k+1}) - i_1(t_k)] + \dots + \int_{t_k}^{t_{k+1}} i_n R_{1n} dt + L_{1n} [i_n(t_{k+1}) - i_n(t_k)] \\ \int_{t_k}^{t_{k+1}} u_2 dt = \int_{t_k}^{t_{k+1}} i_1 R_{12} dt + L_{12} [i_1(t_{k+1}) - i_1(t_k)] + \dots + \int_{t_k}^{t_{k+1}} i_n R_{2n} dt + L_{2n} [i_n(t_{k+1}) - i_n(t_k)] \\ \vdots \\ \int_{t_k}^{t_{k+1}} u_n dt = \int_{t_k}^{t_{k+1}} i_1 R_{1n} dt + L_{1n} [i_1(t_{k+1}) - i_1(t_k)] + \dots + \int_{t_k}^{t_{k+1}} i_n R_{nn} dt + L_{nn} [i_n(t_{k+1}) - i_n(t_k)] \end{cases} \quad (4)$$

在计算机软件编程处理各项积分值时,可利用梯形法来近似求得,表示为:

$$\begin{cases} [u_1(t_{k+1}) + u_1(t_k)]T_s/2 = [i_1(t_{k+1}) + i_1(t_k)]R_{11}T_s/2 + \\ L_{11}[i_1(t_{k+1}) - i_1(t_k)] + \dots + [i_n(t_{k+1}) + i_n(t_k)] \cdot \\ R_{1n}T_s/2 + L_{1n}[i_n(t_{k+1}) - i_n(t_k)] \\ [u_2(t_{k+1}) + u_2(t_k)]T_s/2 = [i_1(t_{k+1}) + i_1(t_k)]R_{12}T_s/2 + \\ L_{12}[i_1(t_{k+1}) - i_1(t_k)] + \dots + [i_n(t_{k+1}) + i_n(t_k)] \cdot \\ R_{2n}T_s/2 + L_{2n}[i_n(t_{k+1}) - i_n(t_k)] \\ \vdots \\ [u_n(t_{k+1}) + u_n(t_k)]T_s/2 = [i_1(t_{k+1}) + i_1(t_k)]R_{1n}T_s/2 + \\ L_{1n}[i_1(t_{k+1}) - i_1(t_k)] + \dots + [i_n(t_{k+1}) + i_n(t_k)] \cdot \\ R_{nn}T_s/2 + L_{nn}[i_n(t_{k+1}) - i_n(t_k)] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $T_s = t_{k+1} - t_k$ 为采样周期。

转换为矩阵形式并将其离散化为:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{12} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{1n} & R_{2n} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_1(k+1) + i_1(k)]T_s/2 \\ [i_2(k+1) + i_2(k)]T_s/2 \\ \vdots \\ [i_n(k+1) + i_n(k)]T_s/2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{12} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{1n} & L_{2n} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_1(k+1) - i_1(k)] \\ [i_2(k+1) - i_2(k)] \\ \vdots \\ [i_n(k+1) - i_n(k)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [u_1(k+1) + u_1(k)]T_s/2 \\ [u_2(k+1) + u_2(k)]T_s/2 \\ \vdots \\ [u_n(k+1) + u_n(k)]T_s/2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由上式可看出,由于电阻与电感矩阵都为对称阵,所以共有 $n(n+1)$ 个未知数,需要至少 $n(n+1)$ 组独立方程才能求解,在实际测量中,为了提高计算精度,采取了测量多种运行方式下的数据的方法。这种方式使所得到的独立方程的数目多于未知数的

个数,为超定方程组,利用最小二乘法求解。即可得到各线路的零序自阻抗及线路间的零序互阻抗。

此方法的特点:①积分法如果积分区间取得合适,则可兼有一定的滤波作用,从而可以从一定程度抑制高频分量。②可同时测量出各线路的零序自阻抗及线路间的零序互阻抗。③可在各种能够获得一定大小零序电流及零序电压的测量方式下进行测量(如:单相断线、单相短路接地、不平衡负载、外加零序电源等方式)。

2 数字仿真结果

设两条 220 kV 互感线路的参数如表 1 所示。线路 I 零序自阻抗 $38.64 + j145.8359 = 150.9960 \angle 75.1606^\circ \Omega$, 线路 II 零序自阻抗 $9.2000 + j64.8173 = 65.4670 \angle 81.9215^\circ \Omega$, 两线路之间的零序互阻抗为 $2.125 + j7.518 = 7.8126 \angle 74.217^\circ \Omega$ 。

表 1 互感线路参数

线路名称	长度 / km	零序电阻 / $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	零序电感 / $\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$	零序电容 / $\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$	零序互阻抗 / Ω
线路 I	100	0.3864	4.6421	0.07452	$2.125 + j7.518$
线路 II	50	0.184	4.1264	0.07751	$j7.518$

采用基于积分方程的互感线路参数带电测量算法,在四种不同运行方式(单相断线、单相短路接地、不平衡负载、外加零序电源)下进行模拟试验。模拟实验结果如表 2 所示。

3 软件算法结构框图

互感测量计算软件流程图如图 1 所示。

计算幅值相角时所用的数据为稳态下取十个周波进行幅值相角计算后的平均,幅值相角计算是为了从实测数据中消除谐波和直流分量,提取有用的工频信号。

表 2 积分法模拟实验结果

Tab. 2 Experiments results with integral method

运行方式	线路 I 零序自阻抗		线路 II 零序自阻抗		零序互阻抗	
	测量值/ Ω	误差/(%)	测量值/ Ω	误差/(%)	测量值/ Ω	误差/(%)
单相断线	$38.6264 + j144.954$ $150.0122 \angle 75.0789^\circ$	0.65	$9.1534 + j64.9887$ $65.63 \angle 81.9829^\circ$	0.25	$2.1455 + j7.5224$ $7.8224 \angle 74.08^\circ$	0.13
单相短路接地	$38.4856 + j146.1026$ $151.0864 \angle 75.2427^\circ$	0.59	$9.2465 + j65.1474$ $65.80 \angle 81.92^\circ$	0.51	$2.1576 + j7.5386$ $7.8413 \angle 74.02^\circ$	0.37
不平衡负载	$38.3244 + j144.9853$ $149.965 \angle 75.1935^\circ$	0.68	$9.2558 + j64.3261$ $64.9886 \angle 81.82^\circ$	0.73	$2.1457 + j7.4668$ $7.769 \angle 73.96^\circ$	0.56
加零序电源	$38.8532 + j146.0546$ $151.1341 \angle 75.1033^\circ$	0.09	$9.1846 + j64.2355$ $64.889 \angle 81.862^\circ$	0.88	$2.1235 + j7.5318$ $7.8254 \angle 74.25^\circ$	0.17

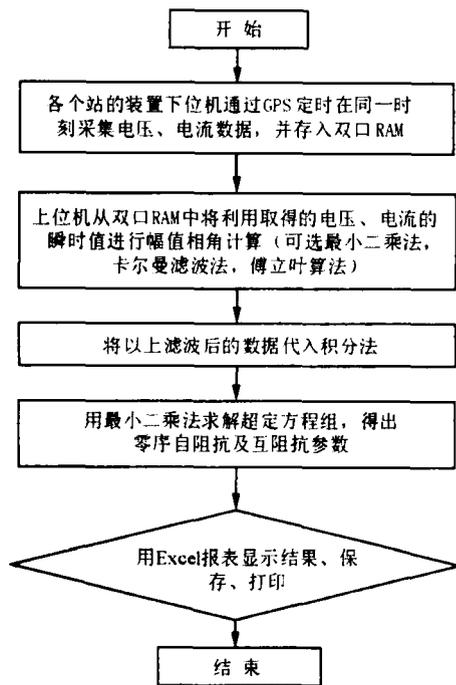


图1 程序框图

Fig. 1 Diagram of the procedure

4 模拟实验

为了验证积分法测量互感线路零序参数的正确性与可行性,以及带电测量系统软硬件设计的实用性,利用本系统进行了模拟实验,并将其实验结果与增量法(其原理在文献[4]中有详细论述)进行比较。在测试手段上采用全球卫星定位系统(GPS)实现测量信号相量的同步测量^[5]。

实验的过程如下:为模拟互感线路组的实际情况,在一个非闭合铁心上平行绕了三个长度不等的线圈 L_1 、 L_2 、 L_3 ,分别来模拟分布于三个变电站(A、B、C)的三条带互感的线路,在其中一绕线上加压,利用开关 K 的开合来模仿断路器的跳闸与重合闸动作。模拟互感的线圈示意图如图2所示。

首先在线圈 L_1 上加上实验电源,并将线圈 L_1 、 L_2 、 L_3 的电压、电流信号分别接入到三台数据采集

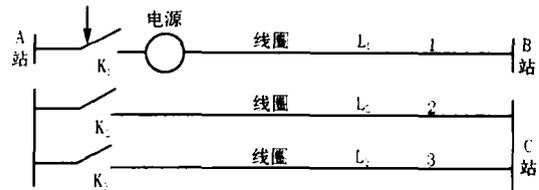


图2 模拟互感线路的线圈的测量示意图

Fig. 2 Diagram of the measurement system

装置(A、B、C)相应的电压、电流端子。然后由三台装置的前置机程序分别根据每台机上GPS传送的时间信号设定统一的采样时间,并由A站的前置机发出的合闸信号来控制线圈1上的刀闸 K_1 的合闸与断开,以此来产生计算所需要的电压、电流信号。测量方式如表3所示。

表3 测量方式表

Tab. 3 Operation states of lines

在 L_1 上加电源(K_1 合)	运行方式			
L_2 线上A站侧刀闸 K_2	开	开	合	合
L_3 线上A站侧刀闸 K_3	开	合	开	合

最后,我们还利用傅里叶算法、最小二乘算法和卡尔曼算法等具有强大的数字滤波能力算法来进行数字信号处理,以提高测量精度;并采用了最小二乘法等方法解决了测量中出现的超定方程组的求解问题。积分法的最终计算结果如表4所示,单位为 Ω 。

从表4的试验结果可以看出,用三种参数辨识方法最终得到的结果相近,而且积分法与增量法得到的结果也相近。另外,由于积分法所用的测量信号用的是一种状态下的信号,可不必象增量法那样必须通过控制断路器跳闸来获得零序电流增量。因此,本文所采用的基于积分方程的互感线路参数带电测量方法(积分法)比增量法更加灵活,并且能够达到预期的目的。

5 结论

本文提出的测量方法可以同时测量线路之间的互电阻与互电感,同时并行完成各参数的测量,改变

表4 试验结果对照表

Fig. 4 Experiment results

阻抗	积分法			增量法
	最小二乘法	卡尔曼滤波法	傅里叶算法	
Z11	23.975 6 + j17.479 3	23.965 4 + j17.483 9	23.976 3 + j17.480 3	23.965 4 + j17.482 1
Z22	25.591 4 + j17.671 5	25.632 2 + j17.681 2	25.606 6 + j17.669 8	25.146 5 + j17.541 2
Z33	11.054 12 + j4.601 4	11.045 32 + j4.602 1	11.056 8 + j4.610	10.994 2 + j4.608
Z12	2.063 6 + j15.766 9	2.073 6 + j15.764 5	2.0654 + j15.776	2.068 5 + j15.754 2
Z13	0.750 2 + j8.196 7	0.749 9 + j8.203 4	0.751 1 + j8.199	0.751 2 + j8.201 7
Z23	0.776 8 + j8.137 256	0.774 6 + j8.140	0.780 1 + j8.139 1	0.781 1 + j8.129 9

了以往的线路互感参数只能在停电状态下逐一地进行测量的情况,大大提高了测量的准确度和效率,因此本文所提出的基于积分方程的互感线路参数带电测量方法对于提高电力系统继电保护整定的精确性,减少供电损失,提高电力系统供电可靠性和安全运行水平无疑具有十分积极的意义。

参考文献:

- [1] 何仰赞,等. 电力系统分析[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1992.
HE Yang-zan, et al. Electric Power System Analysis[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1992.
- [2] 沈其瑜. 架空线路参数计算方法探讨[J]. 四川电力技术, 1995, 18(4): 52-56.
SHEN Qi-yu. Discussion on Calculation Method of Overhead Line Parameter [J]. Sichuan Power Technology, 1995, 18(4): 52-56.
- [3] CHEN Yun-ping, WANG Xu-rui, HAN Bao-liang. The Principles and Computer-based Realization of Zero-sequence Parameter Measurement of Transmission Line with Mutual Inductance [A]. International Power Engineering Conference. Singapore: 1995.
- [4] 胡志坚,张承学,陈允平. 基于 GPS 的线路参数带电测量方法[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 4-7.
HU Zhi-jian, ZHANG Cheng-xue, CHEN Yun-ping. A New Method of Parameters Live Line Measurement of Transmission Lines Based on GPS Technology [J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 4-7.
- [5] 胡志坚. 基于 GPS 的线路参数带电测量研究及实现(硕士学位论文)[D]. 武汉:武汉大学, 1999.
HU Zhi-jian. The Study and Realization of Live Line Measurement to Parameters of Transmission Lines with Mutual Inductance Based on GPS, Thesis [D]. Wuhan: Wuhan University, 1999.

收稿日期: 2004-11-29; 修回日期: 2005-01-12

作者简介:

胡宁(1977-),女,硕士,从事电力系统继电保护管理工作;E-mail:ba225368@sina.com

郑罡(1975-),男,硕士,从事电力系统生产技术管理工作;

胡志坚(1969-),男,博士,副教授,从事电力系统稳定控制、自动化方面的研究工作。

Study of live line measurement of parameters of transmission lines with mutual inductance based on integral equations

HU Ning¹, ZHENG Gang¹, HU Zhi-jian²

(1. Yueyang Electric Power Bureau, Yueyang 414000, China;

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

Abstract: The conventional methods of measuring transmission lines parameters were briefly reviewed and a new integral equation method of live line measurement of transmission lines' mutual inductance parameters was proposed. The new method turned the volt-ampere characteristic equation of transmission lines into an integral form, then used least square method to solve the equations and got the zero-sequence parameters. The principle and corresponding mathematical models of the new method were explained. Moreover, digital simulation results with the new methods were shown and the software algorithms was deduced. Finally, an experiment was introduced and the comparison between the incremental method and the integral equation method was given. Experiment results showed that the new method is accurate and believable. Compared with incremental approach, the new method can suppress the high-frequency parts and this method seldom need an extra power.

Key words: power system; mutual inductance; live line measurement; integral equations; GPS

(上接第 18 页 continued from page 18)

Differential protection test of no-load transformer

CHENG Xu

(Dispatch Center of Jiaozuo Electric Power Bureau, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The paper presented a method to ensure the connection correctness of load test protection in newly built no-load transformer. The method employed the circular current caused by tap control of parallel operated load-ratio voltage transformer to solve the above problems.

Key words: load test; circular-current; load-ratio voltage transformer; relay protection