

宁夏电网 220 kV 互感线路参数带电测量

胡志坚¹, 陈允平¹, 张承学¹, 王 立², 罗 宁²

(1. 武汉水利电力大学电力系, 武汉 430072; 2. 宁夏电力试验研究所, 银川 750001)

摘要: 简要介绍了互感线路参数带电测量理论和关键技术, 详细介绍了采取外加零序电源和通过对带电运行线路采取单相断路器短时跳闸获取测量源这两种带电测量方法, 并进行了宁夏电网 220 kV 互感线路参数的现场带电测量实验。文中给出了试验电源的选取方法、具体的测量接线图、测量步骤、数据处理方法和测量结果。实测结果表明带电测量方法不但简单、测量精度高, 而且完全能满足工程要求。

关键词: 输电线路; 零序; 自感; 互感; 带电测量; GPS

中图分类号: TM 726; TM 934

0 引言

随着电力系统的发展, 互感线路越来越多。以往线路的零序参数往往采用有关公式^[1]计算出来, 但公式计算值和实际值有很大的差异, 因此我国继电保护规程规定零序参数必须实测。常规的测量方法在文献[2]中有详细的介绍, 需要指出的是, 这些测量方法不仅测量工作量大, 而且存在因某些线路不能停电而无法测量的难题。我们利用文献[2]中提出的带电测量新理论, 成功地开发了线路互感参数带电测试系统, 解决了互感线路零序参数带电测量的实际难题。本文以该系统首次成功地应用于宁夏电网 220 kV 互感线路参数的带电测量为例, 介绍了带电测量时要解决的几个重要问题。

1 带电测量的基本原理与关键技术

带电测量的原理在文献[2]中有详细的论述, 本文只简要说明。设有 n 条互感线路, 编号分别为 1, 2, $\dots$, n 。当零序电流加到被测系统时, 所有有互感的线路上都会产生零序电流的增量, 所有与被测线路有关的母线都会产生零序电压增量。被测系统的零序电流增量方程为:

$$\begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_1 \\ \Delta \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \Delta \dot{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_1 \\ \Delta \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其紧凑形式为:

$$Z \Delta \dot{I} = \Delta \dot{U} \quad (2)$$

式中 Z 为待计算零序阻抗矩阵; $\Delta \dot{I}$ 为各条线路的零序电流增量矢量; $\Delta \dot{U}$ 为各条线路的零序电压增量矢量。

增量的产生, 可以分别在某一条停电线路上外加足够大的零序电流, 也可以由继电保护装置短时 (1.0 s 左右) 断开线路某一相, 然后重合该线路来产生一个零序大电流, 这是保证带电测量的关键技术。由于测量是在多个地域上相隔甚远的发电厂、变电站中进行的, 为了测得增量, 并使测得的数据具有同时性, 利用全球卫星定位系统 (GPS) 可获得误差小于 $1 \mu\text{s}$ 的时间基准, 这是保证带电测量的另一关键技术。

带电测试系统的硬件结构和软件算法在文献[3]中有详细的介绍, 本文从略。

2 现场带电测量实例

互感线路参数带电测量系统已成功地用于互感线路零序参数的现场测量中, 文献[3]介绍了本系统用于河南电网互感线路参数测量情况, 这次测量是在线路完全停电情况下进行的, 测量结果的精确性虽得到了证实, 但不是带电测量。

1999 年 11 月 24 日~27 日, 我们首次成功实现了对宁夏电网大武口电厂、银川变、新城变 220 kV 线路零序互感参数的带电测量。

由于被测互感线路是宁夏电网的主干线路, 宁夏电网南北之间的负荷交换是靠该线路实现的, 因此不可能将该线路组全部停电来测量线路零序参数, 而只能采取带电方法来测量该互感线路组的零序参数。被测互感线路组示意图如图 1 所示。

被测线路电压等级为 220 kV, 各线路长度分别为 74.47 km, 75.97 km 和 76.2 km, 其中武银甲与

武新线同杆架设。线路的零序参数参考值(公式计算值)如表 1 所示。



图 1 被测互感线路示意图

Fig. 1 Diagram of the transmission lines with mutual inductance

表 1 线路零序参数参考值

Table 1 The zero sequence parameters calculated by formulas

线路名称	零序参数		
	R_0	X_0	Z_0
武银甲线	24.999	83.109	86.787
武银乙线	25.503	84.783	88.536
武新线	25.581	85.041	88.806

在本次测量中,分别采取了两种注入零序电流的测量方法。

方法一:分别将被测互感线路组某一条线路停电,加上试验电源,其他线路仍然带电运行。为了使其他运行的互感线路上 $3I_0, 3U_0$ 有足够大的变化,试验线路上外加零序电流在 100 A 以上。具体的测量方法在文献[3]中有详细的介绍。

方法二:在被测互感线路均处于带电运行时,带电测量系统通过继电保护装置将其中一条线路的单相断路器跳闸,经短时间(1.152 s)后再重合闸,以产生足够大的零序增量。

采用方法二得到如表 2 所示不同拓扑方式时的测量数据。武银甲线单相跳闸再重合闸时的测量接线如图 2 所示。

表 2 带电测量时线路运行方式

Table 2 The operation states of the lines for measurement

运行方式	武银甲线	武银乙线	武新线
1	单相跳闸	运行	运行
2	运行	单相跳闸	运行
3	运行	运行	单相跳闸

带电测量步骤如下:

a. 首先各测量站(A,B,C 站)将各线路与零序有关的保护退出后,按图 2 所示测量接线图接好测量装置。将母线电压互感器(TV)开口三角的 $3U_0$ 和线路电流互感器(TA)零序回路的 $3I_0$ 分别接入同步采集装置的电压和电流通道中(每台装置可同时采集 8 路电压,24 路电流),并将各通道的挡位调整到合适的位置(1,2,3,4 挡)。控制线路单相断路器

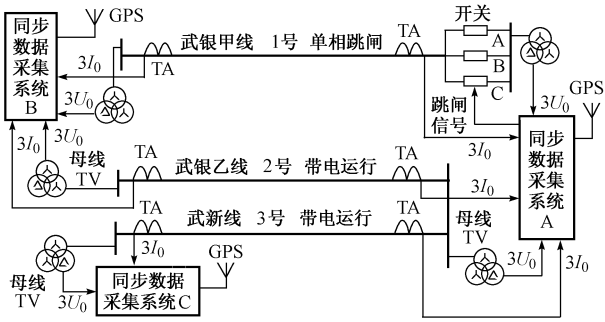


图 2 武银甲线单相跳闸时的测量接线图

Fig. 2 The wiring diagram with Wuyin No. 1 line single-phase breaker tripping

跳闸的信号由 A 装置(主站)发出。

b. 当各测量站的 GPS 接收机接收到 4 颗以上卫星信息时,表明 GPS 时间已同步。各站点在 A 站指示下按下采集装置面板上“整十分钟启动”按键。

c. 当整 10 min 时间到来时,A 装置发出跳闸信号,通过继电保护装置跳开运行线路的某一相(如 B 相),经 1.152 s 后,通过自动重合闸装置重新合上跳闸线路。各测点的采集装置同时采集线路跳闸前 0.384 s(19.2 周期)和跳闸后 1.152 s(57.6 周期)的数据,并打上 GPS 时标。

d. 在数据采集完成后,各采集装置将采集到的数据通过串行口自动传送到与之相连的便携机(或 PC 机),以 GPS 时间为文件名,将数据保存在硬盘中。同时将各线路 TA、母线 TV 的变比,通道号及挡位等信息存入相应的文件中。

e. 按表 2 改变测量(运行)方式,重复步骤 a~步骤 d。

f. 在所有测量完成后,通过 Modem 将 B 站和 C 站的数据送到 A 站,A 站在汇总所有的测量数据后,用互感计算软件包离线计算出线路的零序参数。

武银甲线单相断路器短时跳闸采集的一组数据(局部波形)如图 3~图 6 所示。图中数字 1,2 和 3 分别表示武银甲线、武银乙线和武新线的零序电流(或零序电压)。

从现场采集的零序电压、零序电流看,谐波非常严重,电压波形的畸变尤为严重。武银甲线单相断路器跳闸前后的零序电压幅值频谱如图 7、图 8 所示。

零序参数的离线计算可分为 3 个步骤处理[4]:

a. 零序基波分量的计算,即计算 I_0, U_0 的基波分量的幅值和初相角。可用改进傅里叶算法、卡尔曼滤波算法或最小二乘算法来计算。

b. 零序增量的计算,即计算 $\Delta \dot{I}, \Delta \dot{U}$ 。设线路 i ($i=1,2,3$)在断路器跳闸前的电流为 $\dot{I}_i$,线路 i 两端母线的电压分别为 $\dot{U}_{ip}, \dot{U}_{iq}$;跳闸后的线路电流为

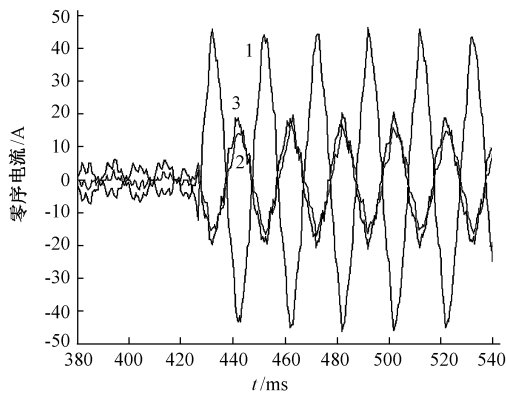


图 3 系统 A 采集的各线路零序电流
Fig. 3 The currents recorded by system A

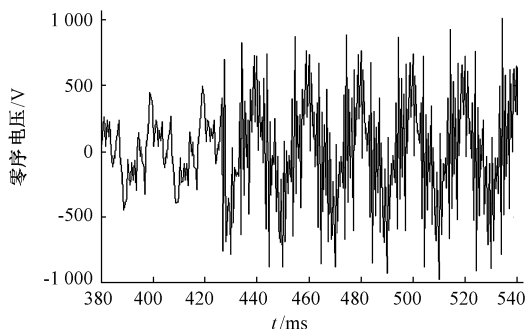


图 4 系统 A 采集的线路 1 母线的零序电压
Fig. 4 Voltage of No. 1 line recorded by system A

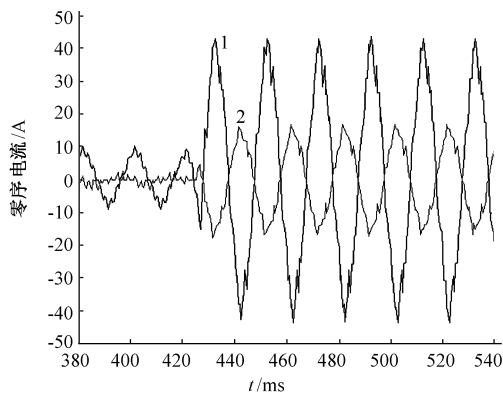


图 5 系统 B 采集的线路 1, 2 的零序电流
Fig. 5 Currents of No. 1 and No. 2 line recorded by system B

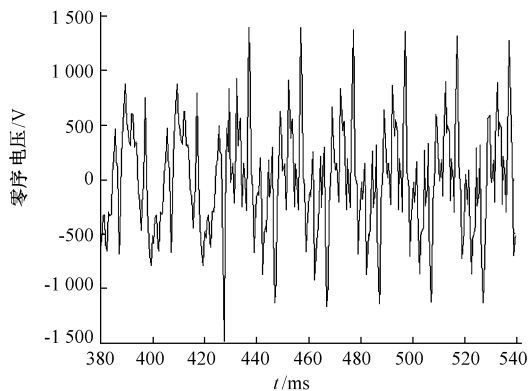


图 6 系统 C 采集的线路 3 的零序电压
Fig. 6 Voltage of No. 3 line recorded by system C

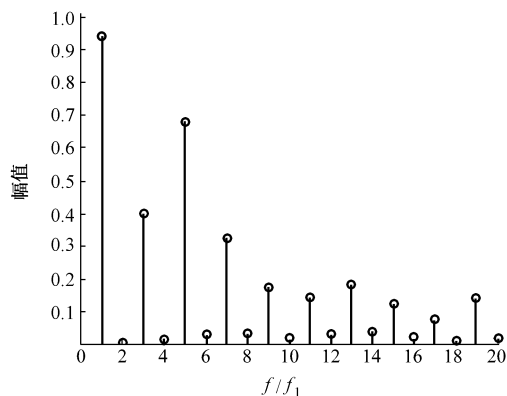


图 7 跳闸前的零序电压幅值频谱
Fig. 7 Spectrum of voltage amplitude before the breaker tripping

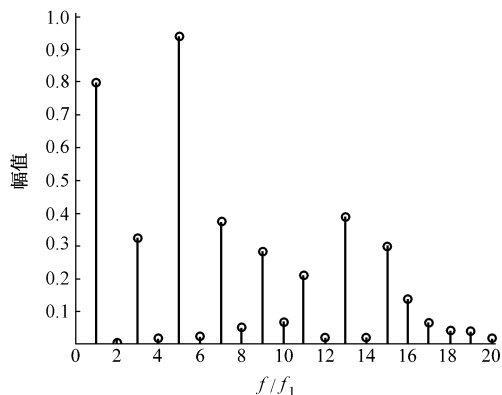


图 8 跳闸后的零序电压幅值频谱
Fig. 8 Spectrum of voltage amplitude after the breaker tripping

$\dot{I}_i'$, 线路两端的母线电压分别为 $\dot{U}_{ip}'$, $\dot{U}_{iq}'$ 。则零序增量为:

$$\Delta \dot{I}_i = \dot{I}_i' - \dot{I}_i$$

$$\Delta \dot{U}_i = (\dot{U}_{ip}' - \dot{U}_{iq}') - (\dot{U}_{ip} - \dot{U}_{iq})$$

c. 求解方程组 $\mathbf{Z} \Delta \dot{\mathbf{I}} = \Delta \dot{\mathbf{U}}$, 得到待求的互感线路零序阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 。

需要说明的是, 对于 n 条互感线路组, 需要有 $n(n+1)/2$ 个线性独立方程才能解出 $n(n+1)/2$ 个未知数。对本次测量而言, 每一种测量方式可得到以

下 3 个独立的方程:

$$z_{11} \Delta \dot{I}_1 + z_{12} \Delta \dot{I}_2 + z_{13} \Delta \dot{I}_3 = \Delta \dot{U}_1$$

$$z_{21} \Delta \dot{I}_1 + z_{22} \Delta \dot{I}_2 + z_{23} \Delta \dot{I}_3 = \Delta \dot{U}_2$$

$$z_{31} \Delta \dot{I}_1 + z_{32} \Delta \dot{I}_2 + z_{33} \Delta \dot{I}_3 = \Delta \dot{U}_3$$

故在 3 种不同测量方式下可得到 9 个独立的方

程。由于 $z_{12}=z_{21}, z_{13}=z_{31}, z_{23}=z_{32}$ ，因此实际未知数的个数只有 6 个，所以方程组为超定方程组，需用最小二乘估计方法求解。

表 3 为采用外加零序源方式测量结果，表 4 为线路单相跳闸方式测量结果。

表 3 采用外加零序源方式测量结果

Table 3 The results with an external voltage source

Ω

阻抗	武银甲	武银乙	武新线
武银甲	11.447+j92.655 ¹⁾	3.915+j17.967	5.354+j43.380
武银乙		11.143+j93.910 ¹⁾	2.823+j25.434
武新线			16.377+j97.842 ¹⁾

注:1)为线路零序自阻抗,其余为零序互阻抗。

表 4 采用单相跳闸方式测量结果

Table 4 The results with the single-phase breaker tripping

Ω

阻抗	武银甲	武银乙	武新线
武银甲	12.445+j94.416 ¹⁾	5.684+j16.224	6.715+j45.698
武银乙		13.483+j98.762 ¹⁾	4.802+j28.169
武新线			15.758+j101.517 ¹⁾

注:1)为线路零序自阻抗,其余为零序互阻抗。

比较表 1、表 3 和表 4 的结果可以看出，公式计算值与带电测量值相差很大，采用加压方式测量值与单相跳闸方法测量值非常接近。带电测量方法采用同步采样、数据滤波和参数估计等技术^[4]，因此带电方法测量结果是精确的。

3 结语

本文介绍了采用外加电流和采用线路单相断路器短时跳闸再重合来产生零序电流增量两种带电测量方法，成功地进行了宁夏电网 220 kV 互感线路零序参数的带电测量。从测量过程看，带电测量方法省时省力，对电网的安全运行没有影响，是完全可行

的，测量结果也完全满足工程要求。

参考文献

1 何仰赞,温增银,汪馥英,等(He Yangzan, Wen Zengyin, Wang Fuying, et al). 电力系统分析(Electric Power Systems Analysis). 武汉:华中理工大学出版社(Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press), 1992

2 陈允平,王旭蕊,韩宝亮(Chen Yunping, Wan Xurui, Han Baoliang). 互感线路零序带电测量的理论及其微机实现(The Principle and Computer-Based Realization of Zero-Sequence Parameter Measurement of Transmission Lines with Mutual-Inductance). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1995,19(2): 38~42

3 胡志坚,刘美观,张承学,等(Hu Zhijian, Liu Meiguan, Zhang Chengxue, et al). 互感线路零序参数带电测量研究与实现(Principles and Realization of Live Line Measurement to Parameters of Transmission Lines with Mutual Inductance). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1999,23(24):32~35

4 胡志坚(Hu Zhijian). 基于 GPS 的互感线路参数带电测量研究与实现(The Study and Realization of Live Line Measurement to Parameters of Transmission Lines with Mutual Inductance Based on GPS, Ph D Dissertation). 武汉:武汉水利电力大学(Wuhan: Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering),1999

胡志坚,男,博士,讲师,从事电力系统继电保护和自动化方面的研究。

陈允平,男,教授,博士生导师,国务院学位委员会电工学科评议组成员,主要从事电力系统继电保护、电力系统稳定控制、自动化方面的研究。

张承学,男,教授,主要从事电力系统稳定、继电保护、自动化方面的研究。

LIVE LINE MEASUREMENT OF PARAMETERS OF 220 kV TRANSMISSION LINES WITH MUTUAL INDUCTANCE IN NINGXIA POWER NETWORK

Hu Zhijian¹, Chen Yunping¹, Zhang Chengxue¹, Wang Li², Luo Ning²

(1. Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, Wuhan 430072, China)

(2. Ningxia Electric Power Test and Research Institute, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Based on GPS technology, the principles and key techniques for live line measurement of zero-sequence parameter of transmission lines with mutual inductance are brought forward firstly. Then two methods for live line measurement of 220 kV transmission lines in Ningxia Power Network in northwest China are given in detail. One method is using an external power source, the other is using the method to trip the single-phase breaker of the operation line and quickly turn on the breaker to produce a large zero sequence current for measurement. Selection of the method of the test, the power source, the wiring diagram, the measurement measures, the data processing method and live line measurement results are given. The results prove that the system can meet the need of live line measurement of parameters of transmission lines.

Keywords: transmission line; zero sequence; self inductance; mutual inductance; live line measurement; GPS