

T型输电线路零序阻抗参数带电测量研究

熊启新¹, 张承学², 胡志坚², 帅玲玲¹

(1. 江西省电力公司超高压分公司, 江西 南昌 330096; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出一种T接线输电线路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测量原理与数学模型, 并给出带电测量时T型线路的运行方式, 通过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。通过数字仿真进行验证, 仿真结果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: GPS; T型输电线路; 零序阻抗; 带电测量

Live line measurement to the zero sequence impedance parameters of multi-terminal transmission lines

XIONG Qi-xin¹, ZHANG Cheng-xue², HU Zhi-jian², SHUAI Ling-ling¹

(1. Extra High Voltage Branch, Jiangxi Electric Power Co, Nanchang 330096, China;

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

Abstract: Based on GPS technology, a novel method of live line measuring the zero sequence parameters of multi-terminal transmission lines is proposed. The operation modes of the transmission lines for live line measurement are given. The mathematical model of the new method is explained in detail. The methods to obtain big zero-sequence currents for live line measurement are introduced. In order to realize the synchronization of data acquisition, a GPS is used to obtain an accurate time tag for all the currents and voltages sampled at different substations. The digital simulation results are given. The simulation results prove that the new method can meet the needs of live line measurement of inductance parameters.

Key words: global positioning system(GPS); multi-terminal transmission line; zero sequence impedance; live line measurement

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0065-04

0 引言

随着电力系统规模的发展, 发电厂(变电站)出线增多, T接线输电线路越来越多^[1-2]。T型输电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, 对零序电流保护的影响极大^[3-4]。由于T型线路的零序阻抗受到很多因素的影响, 如线路走向、零序电流流经区域的接地电阻率等。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。因此继电保护整定的规定指出: 架空线路和电缆的零序阻抗、其他对继电保护影响较大的参数应使用实测值。

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]; 由于计算公式中涉及到大地电阻率等不确切参数, 因此公式计算结果是不准确的。停电测量法测量T型线路参数的方法要求被测线路停电, 要对T型线路停电进行测量经常是不可能的。因此, 寻求一种新的T型线路参数带电测量方法, 开发相应的测试系统, 不仅具有重要的理论价值, 而且具有很大的经济与社会效益。本文提出了一种T型线路零序阻抗参数带电测量方法, 研制了基于GPS的T型输电线路零序阻抗参数带电测量装置, 可实现T型输电线路带电运行时零序阻抗参数的准确测量。

1 带电测量数学模型与测量方法

1.1 数学模型

T型输电线路模型如图1所示。其中, r_n 为第 n

条支路的电阻, L_n 为第 n 条支路的电感, 其中 $n=1,2,3$, i_1, i_2, i_3 分别为各支路零序电流瞬时值, u_1, u_2, u_3 分别为各支路端点处的零序电压瞬时值, u_T 是 T 触点处的零序电压瞬时值。

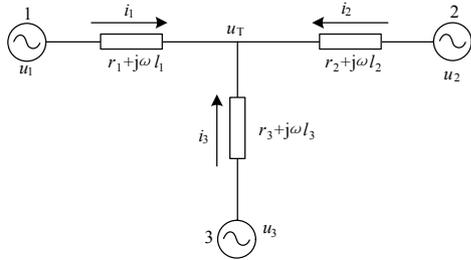


图 1 T 型输电线路示意图

Fig.1 Diagram of T-type transmission line

由图 1 可列写出 T 型输电线路微分方程组如下:

$$\begin{cases} u_1 - u_2 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - r_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} \\ u_1 - u_3 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - r_3 i_3 - L_3 \frac{di_3}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

用 $[i_n(k+1) - i_n(k-1)]/2T_s$ 代替微分方程组中的导数项 $\frac{di_n}{dt}$; 其中: $n=1, 2, 3$ 。将微分方程组 (1) 写成离散形式:

$$\begin{cases} u_1(k) - u_2(k) = r_1 i_1(k) + L_1 \frac{i_1(k+1) - i_1(k-1)}{2T_s} - r_2 i_2(k) - L_2 \frac{i_2(k+1) - i_2(k-1)}{2T_s} \\ u_1(k) - u_3(k) = r_1 i_1(k) + L_1 \frac{i_1(k+1) - i_1(k-1)}{2T_s} - r_3 i_3(k) - L_3 \frac{i_3(k+1) - i_3(k-1)}{2T_s} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $i_n(k-1)$ 、 $i_n(k)$ 为零序电流注入后的电流信号相邻两个采样时刻零序电流的瞬时采样值; $u_n(k-1)$ 、 $u_n(k)$ 为零序电流注入后电压信号相邻两个采样时刻零序电压的瞬时采样值; T_s 为采样周期。

1.2 带电测量方式

带电测量时, T 型输电线路的运行方式如表 1 所示。

表 1 T 型输电线路的运行方式

Tab.1 Operation mode of T-type transmission line

方式	T 型线路		
	支路 1	支路 2	支路 3
1	单相跳闸, 0.5~1.0 s 后重合	正常运行	正常运行
2	正常运行	单相跳闸, 0.5~1.0 s 后重合	正常运行
3	正常运行	正常运行	单相跳闸, 0.5~1.0 s 后重合

1.3 微分方程组求解

对于微分方程组 (2), 按表 1 中任一种运行方式产生采样测量数据, 任取 3 个相邻的采样点 $k-1$ 、 k 、 $k+1$ 对应的零序电压和零序电流采样值, 得到 2 个独立方程; 另取 3 个相邻的采样点 k 、 $k+1$ 、 $k+2$ 对应的零序电压和零序电流采样值, 再得到 2 个独立方程; 每种独立的测量方式可得到 4 个独立方程; 再按表 1 中其它任何一种或一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 8 个独立的方程, 采用最小二乘法, 解出 6 个未知的零序参数: $r_1, L_1, r_2, L_2, r_3, L_3$ 。

用最小二乘法求解, 得

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

式 (3) 中:

$$U = \begin{bmatrix} u_1^1(k) - u_2^1(k) \\ u_1^1(k) - u_3^1(k) \\ u_1^1(k+1) - u_2^1(k+1) \\ u_1^1(k+1) - u_3^1(k+1) \\ \dots \\ \dots \\ u_1^p(k) - u_2^p(k) \\ u_1^p(k) - u_3^p(k) \\ u_1^p(k+1) - u_2^p(k+1) \\ u_1^p(k+1) - u_3^p(k+1) \end{bmatrix}_{(4 \times p) \times 1} ; Z = \begin{bmatrix} r_1 \\ L_1 \\ r_2 \\ L_2 \\ r_3 \\ L_3 \end{bmatrix}_{6 \times 1} ;$$

$$I = \begin{bmatrix} i_1^1(k) & \frac{i_1^1(k+1)-i_1^1(k-1)}{2T_s} & -i_2^1(k) & -\frac{i_2^1(k+1)-i_2^1(k-1)}{2T_s} & 0 & 0 \\ i_1^1(k) & \frac{i_1^1(k+1)-i_1^1(k-1)}{2T_s} & 0 & 0 & -i_3^1(k) & -\frac{i_3^1(k+1)-i_3^1(k-1)}{2T_s} \\ i_1^1(k+1) & \frac{i_1^1(k+2)-i_1^1(k)}{2T_s} & -i_2^1(k+1) & -\frac{i_2^1(k+2)-i_2^1(k)}{2T_s} & 0 & 0 \\ i_1^1(k+1) & \frac{i_1^1(k+2)-i_1^1(k)}{2T_s} & 0 & 0 & -i_3^1(k+1) & -\frac{i_3^1(k+2)-i_3^1(k)}{2T_s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ i_1^p(k) & \frac{i_1^p(k+1)-i_1^p(k-1)}{2T_s} & -i_2^p(k) & -\frac{i_2^p(k+1)-i_2^p(k-1)}{2T_s} & 0 & 0 \\ i_1^p(k) & \frac{i_1^p(k+1)-i_1^p(k-1)}{2T_s} & 0 & 0 & -i_3^p(k) & -\frac{i_3^p(k+1)-i_3^p(k-1)}{2T_s} \\ i_1^p(k+1) & \frac{i_1^p(k+2)-i_1^p(k)}{2T_s} & -i_2^p(k+1) & -\frac{i_2^p(k+2)-i_2^p(k)}{2T_s} & 0 & 0 \\ i_1^p(k+1) & \frac{i_1^p(k+2)-i_1^p(k)}{2T_s} & 0 & 0 & -i_3^p(k+1) & -\frac{i_3^p(k+2)-i_3^p(k)}{2T_s} \end{bmatrix}_{(4 \times p) \times 6}$$

式(3)中,电流和电压瞬时采样值的上标 p 为独立的测量次数, $2 \leq p \leq 3$,下标为支路编号; k 为采样点数; T_s 为采样周期。

2 测量步骤

T型输电线路零序阻抗参数带电测量方法,包括以下步骤:

(1) 通过T型线路上的继电保护装置断开带电运行的T型线路的任一支路的单相开关,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T型线路上的自动重合闸装置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^[7]。带电测量时,T型输电线路的运行方式如表1所示。

(2) 利用全球卫星定位系统的授时功能获得误差小于 $1 \mu\text{s}$ 的时间基准,在全球卫星定位系统时间同步下,同时采集零序电流注入前后各支路的零序电流瞬时值和各支路端点处的零序电压瞬时值,并以文件的方式存入采集装置中。

(3) 在测量完成后,利用网络将各测量点的数据汇总到中心计算机中。中心计算机在得到T型输电线路的零序电流和零序电压采样数据后,采用微分方程法^[8-9]来计算T型输电线路的零序阻抗

参数。

3 测量系统硬件构成

T型输电线路零序阻抗参数带电测量系统^[9],由GPS天线与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、鼠标和机箱构成。

带电测量系统硬件构成如图2所示。

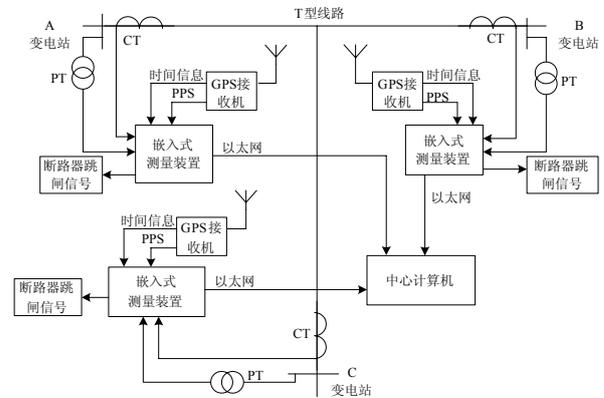


图2 测量系统示意图

Fig.2 Diagram of measurement system

4 数字仿真结果

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。仿真的 T 接线线路的零序阻抗参数如表 2 所示。

表 2 T 接线线路相关参数

参数	支路 1	支路 2	支路 3
长度 / km	25	15	30
零序自阻抗/km	$r_1=0.2671\ \Omega$ $L_1=3.459\ \text{mH}$	$r_2=0.2671\ \Omega$ $L_2=3.459\ \text{mH}$	$r_3=0.2714\ \Omega$ $L_3=3.592\ \text{mH}$

数据采集率为 80 点/周波的仿真计算结果如表 3 所示。从表 3 的仿真结果可以看出,本文提出的带电测量方法原理正确,测量结果准确,具有工程应用价值。

表 3 数字仿真结果

阻抗参数	设定值/ Ω	仿真计算值/ Ω	相对误差 / %
Z_1	6.678+j 27.175	6.722+j 27.312	0.51
Z_2	4.007+j 16.305	4.034+j 16.378	0.46
Z_3	8.142+j 33.854	8.236+j 33.956	0.35

5 结论

本文提出的 T 型接线输电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,经过数字仿真试验,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 T 接线输电线路零序参数的带电测量外,也同样适用于 T 接线输电线路完全停电时的零序参数测量。

参考文献

- [1] 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): 416-420, 437.
SHU Hong-chun, GAO Feng, CHEN Xue-yun, et al. A study on accurate fault location algorithm of EHV T-connection to three terminals[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (6): 416-420, 437.
- [2] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. T 型支接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 Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. Adaptive fault location method for three-terminal transmission line[J]. Transactions of China Electric Technical Society,

- 2004, 19 (10): 59-64.
- [3] 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 Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1):492-500.
- [4] Toshihisa Funabashi, Hitomi Ootoguro, Yoshishige Mizuma. Fault location for high resistance grounded transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999,14(1): 80-85.
- [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.
FU Zhi-lan. Selection of electrical equipments and practical calculations of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [6] 李建明, 朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
LI Jian-ming, ZHU Kang. Testing methods of high voltage electrical equipments[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [7] 胡志坚, 陈允平, 张承学, 等. 宁夏电网 220 kV 互感线路参数带电测量[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (9): 41-44.
HU Zhi-jian, CHEN Yun-ping, ZHANG Cheng-xue, et al. Live line measurement of parameters of 220 kV transmission lines with mutual inductance in Ningxia Power Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (9): 41-44.
- [8] 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 Zhi-jian, CHEN Yun-ping, 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.
- [9] HU Zhi-jian, CHEN Yun-ping. 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): 1288-2195.

收稿日期: 2009-09-07; 修回日期: 2009-10-17

作者简介:

熊启新 (1961-), 男, 总工程师, 研究方向为电力系统及其自动化;

帅玲玲 (1983-), 女, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化. E-mail: abcshuai@163.com