

基于 GPS 的互感输电线路零序分布参数带电测量研究与实现

郭建全¹, 郭建新², 胡志坚³, 湛锋³, 胡宁⁴

(1. 河北省邢台供电公司, 河北 邢台 054000; 2. 河北省邢台县电力局, 河北 邢台 054000;
3. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 4. 湖南岳阳供电公司, 湖南 岳阳 414001)

摘要: 工程不但需要互感线路的零序集总参数, 还需要分布参数。输电线路零序参数带电测量的实现, 不仅减少了停电次数, 还适合于在线参数测量。通过利用 GPS 同步采样装置对线路端电气量的同步测量, 可以计算得到线路的集总参数, 继而可以分别对互感部分和非互感部分求取线路的分布参数。该文首先给出了输电线路分布参数模型和集总参数模型之间的转化公式; 在此基础上, 提出互感线路分布参数在线测量方法, 并通过仿真试验对所提出的方法进行验证。

关键词: GPS 同步时钟; 互感线路; 零序参数; 带电测量; 分布参数

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)19-0019-04

0 引言

随着电力系统的发展, 高压输电线路走向复杂, 空间跨度大, 互感线路越来越多, 互感的存在会影响故障电流的大小, 如果继保整定计算中不计及互感的影响, 易造成保护误动或拒动, 而且零序自感和零序互感的大小受周围环境影响大, 所以我国有关规程规定零序参数必须实测; 输电线路参数带电测量方法^[1,2]可以通过较少次数的测量得到线路的参数, 大大减少了线路的停电次数; 另一方面, 工程上不但需要知道线路的集总参数, 还需要知道线路的分布参数, 甚至对分布参数的精度要求较高 (如行波法故障定位), 所以需要进行集总参数模型和分布参数模型之间的转化, 并且需要对互感部分的分布参数单独求解。

1 输电线路分布参数和集总参数模型及二者之间的转化^[3~5]

1.1 分布参数模型转化为集总参数模型

设长度为 L 的输电线路, 其参数沿线均匀分布, 单位长度 (km) 的阻抗和导纳分别为:

$$Z_0 = R_0 + j L_0 = R_0 + j X_0$$

$$Y_0 = G_0 + j C_0 = G_0 + j B_0$$

传播常数:

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j L_0)(G_0 + j C_0)} = \sqrt{Z_0 Y_0} \quad (1)$$

波阻抗:

$$Z_c = \sqrt{(R_0 + j L_0)/(G_0 + j C_0)} = \sqrt{Z_0/Y_0} \quad (2)$$

可列出距离线路末端 x 处的电压和电流与线路末端电压和电流的关系 (图 1):

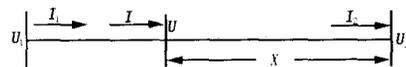


图 1 输电线路分布参数模型

Fig 1 Distributed parameter model of transmission line

$$\begin{cases} U = U_2 \cosh(\gamma x) + Z_c I_2 \sinh(\gamma x) \\ I = I_2 \cosh(\gamma x) + \frac{U_2}{Z_c} \sinh(\gamma x) \end{cases} \quad (3)$$

当 $x=L$ 时, 可得线路首、末端电压和电流之间的关系:

$$\begin{cases} U_1 = U_2 \cosh(\gamma L) + Z_c I_2 \sinh(\gamma L) \\ I_1 = I_2 \cosh(\gamma L) + \frac{U_2}{Z_c} \sinh(\gamma L) \end{cases} \quad (4)$$

将上述方程同二端口网络方程 $\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$ 进行比较可得到:

$$\begin{cases} A = D = \cosh(\gamma L) \\ B = Z_c \sinh(\gamma L) \\ C = \frac{\sinh(\gamma L)}{Z_c} \end{cases} \quad (5)$$

依据式 (5) 可以制定 π 型集中参数等值电路 (图 2):

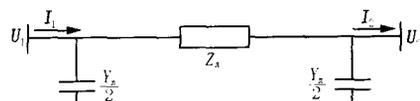


图 2 输电线路 π 型等效集中参数模型

Fig 2 π type lumped parameter model of transmission line

$$Z = B = Z_c \sinh(L) = Z_0 K_2 L \quad (6)$$

$$Y = \frac{2(A-1)}{B} = \frac{2(\cosh(L)-1)}{Z_c \sinh(L)} = Y_0 K_1 L \quad (7)$$

其中: $K_1 = \frac{2(\cosh(L)-1)}{L \sinh(L)}$, $K_2 = \frac{\sinh(L)}{L}$

可以证明:

$$\lim_{L \rightarrow 0} \frac{2(\cosh(L)-1)}{L \sinh(L)} = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\sinh(L)}{L} = 1$$

因为传播常数一般很小,当线路长度 L 较短时(一般小于 100 km), L 也较小,可以认为:

$$K_1 \approx 1, K_2 \approx 1, \text{此时式 (6)、(7) 成为:} \quad (8)$$

$$Z = Z_0 L \quad (8)$$

$$Y = Y_0 L \quad (9)$$

1.2 集总参数模型转化为分布参数模型

由式 (6)和 (7)可得:

$$\frac{\cosh^{-1}\left(1 + \frac{ZY}{2}\right)}{L} \quad (10)$$

因为 $B = Z = Z_c \sinh(L)$, $C = \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) Y =$

$\frac{\sinh(L)}{Z_c}$, 所以可以得到:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{1 + \frac{ZY}{4}}} \quad (11)$$

由式 (1)和 (2)可得:

$$Z_0 = Z_c \quad (12)$$

$$Y_0 = \frac{1}{Z_c} \quad (13)$$

在线路长度较短时,可以按下式计算:

$$Z_0 = Z / L \quad (14)$$

$$Y_0 = Y / L \quad (15)$$

需要说明:由表达式可以看到, Z 和 Y 是与传输常数有关的,即 Z 和 Y 是包含了波过程的量,所以从理论上讲,通过对线路端电气量的测量,计算得到的 Z 型等值参数值不是一般意义上的阻抗和导纳,之所以仍这样称呼,一是因为在集总参数模型下,符合人们的习惯;二是因为对于不太长的线路(一般 100 km 以内)不考虑波过程和考虑波过程得到的参数相差很小,可以用式 (8)、(9)、(14)、(15) 近似计算,即可满足工程需要的精度。

2 互感线路零序参数带电测量

带电测量的基本原理^[6,7]是:对于互感线路组

成的被测系统,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,同时,线路两端电压差也会产生一个增量,这些增量可以通过同步测量每条线路两端母线处的电流和母线电压相量计算得到,通过这些增量列参数的恰定或超定方程,从而解出这些参数。实际工程应用同步采集系统如图 3 所示(图中只画出 2 个站点)。

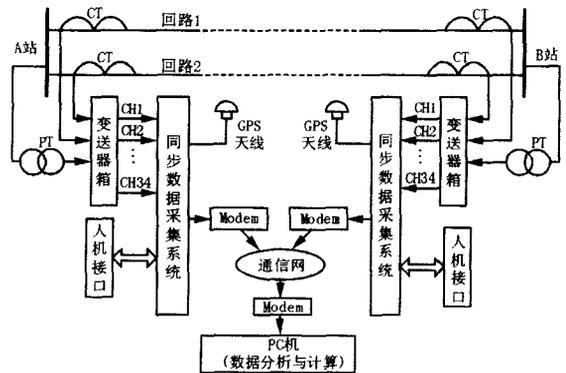


图 3 基于 GPS 的同步采样系统

Fig 3 Synchronous sampling system based on GPS

2.1 互感双回路零序集总参数带电测量方法

建立集中参数模型如图 4,如计及充电电容的影响时,可以先通过开路试验线路得电容;通过改变互感线路系统的运行方式,可以得到足够的方程解出参数。

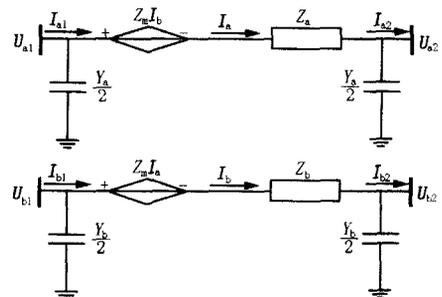


图 4 双回互感线路型集中参数模型

Fig 4 type lumped parameter model of two transmission lines with mutual inductance

对于每次运行方式改变,须同步测量改变前和改变后的电压和电流相量,参考图 4,分别记为: U_{a1} 、 U_{a2} 、 U_{b1} 、 U_{b2} 、 I_{a1} 、 I_{a2} 、 I_{b1} 、 I_{b2} 和 U_{a1} 、 U_{a2} 、 U_{b1} 、 U_{b2} 、 I_{a1} 、 I_{a2} 、 I_{b1} 、 I_{b2} 。

则可以求得 a 线的电流增量为: $I_{a1} = I_{a1} - I_{a1}$, $I_{a2} = I_{a2} - I_{a2}$; 电压增量为: $U_a = (U_{a1} - U_{a1}) - (U_{a2} - U_{a2})$; b 线同理。满足方程:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} - U_a \frac{Y_a}{2} \\ I_{b1} - U_b \frac{Y_b}{2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

或

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a2} + U_a \frac{Y_a}{2} \\ I_{b2} + U_b \frac{Y_b}{2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

线路较短时,不考虑电容电流影响,认为 $I_{a1} = I_{a2}$, $I_{b1} = I_{b2}$,方程化为:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad (18)$$

可以看到,式(16)、(17)或(18)中含有 Z_a 、 Z_b 和 Z_m 3个未知数,2个等式。通过3种不同的运行方式(运行方式改变2次),可以列出一个含有4个等式的方程,用最小二乘法解这个超定方程可以求出这3个未知数。

定义:

$$U = \begin{bmatrix} U_a^{(1)} & U_a^{(2)} \\ U_b^{(1)} & U_b^{(2)} \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_a^{(1)} & I_a^{(2)} \\ I_b^{(1)} & I_b^{(2)} \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}$$

式中带括号的上标为测量次数的编号,下标为线路号; I 中的元素可以是式(16)或式(17)右边的电流增量修正形式。

可以得到: $U = Z \cdot I$,

用最小二乘估计^[8]可以解出:

$$Z = U \cdot I^T \cdot (I \cdot I^T)^{-1} \quad (19)$$

2.2 互感多回路零序集总参数带电测量方法

由以上分析,很容易将互感双回路推广到互感多回路的情况,设有 n 条互感线路,定义第 i 次测量的电压和电流增量矢量分别为:

$$U^{(i)} = [U_1^{(i)}, U_2^{(i)}, \dots, U_n^{(i)}]^T \text{ 和 } I^{(i)} = [I_1^{(i)}, I_2^{(i)}, \dots, I_n^{(i)}]^T$$

对于精确计算, $I^{(i)}$ 是如式(16)或(17)右端的修正形式,设进行了 m 次测量,则电压和电流增量矩阵为:

$$U = [U^{(1)}, U^{(2)}, \dots, U^{(m)}] \text{ 和 } I = [I^{(1)}, I^{(2)}, \dots, I^{(m)}]$$

$$\text{阻抗矩阵为: } Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix}$$

其中:对角线元素为自阻抗,非对角线元素为互阻抗,且 $z_{ij} = z_{ji} = z_{mij}$,所以 Z 为对称阵,其中未知数个数为 $\frac{n(n+1)}{2}$,所以测量次数应满足 $m \geq \frac{n(n+1)}{2}$;同理应用最小二乘估计可得:

$$Z = U \cdot I^T \cdot (I \cdot I^T)^{-1}$$

将参数辨识理论中的最小二乘估计理论应用于参数测量问题,可以显著地提高计算精度,因为实际测量中许多因素都会产生随机误差信号,而最小二乘估计是基于最小估计方差的一种算法^[8,9]。

2.3 互感线路零序分布参数计算

求出总的自阻抗 Z_{Σ} 和互阻抗 Z_m 后,可以进行分布参数计算。

设互感线路的全长为 L_{Σ} ,互感段的长度为 L_m ,因为充电电容电流本身相对较小,且充电电容电流在考虑互感影响和不考虑互感影响两种情况下变化不大,所以对自参数的计算结果影响不大,仿真也证实了这一点,可直接用 Z_{Σ} 、 Y_{Σ} 和 L_{Σ} 代入式(10)、(11)、(12)和(13)计算出分布自参数 Z_0 和 Y_0 ;对于 L_{Σ} 较小时,可忽略 Y 的影响,直接用式(14)、(15)计算。

求取分布互阻抗时,将 Z_m , $Y_m = \frac{L_m}{L_{\Sigma}} Y_{\Sigma}$ 和 L_m 代入式(10)、(11)、(12)和(13)求得 Z_{m0} ;对于 L_m 较短,可直接用式(14)计算。

3 仿真对比

用 Matlab 中分布参数线路模型进行了仿真,为简便,设互感双回路总长度和零序自参数均相同。

设总长度为 L (km) 和互感段长度为 L_m (km),取3种不同组合进行仿真,计算值与设定值进行了对比(表1)。

误差表示为:

$$\frac{\text{真实值} - \text{仿真值}}{\text{真实值}} \times 100\%$$

可以看到:自参数和互参数的误差均随着线路长度的增加而加大,电阻误差较电抗的误差要大;虽然电阻误差较大,但由于其比例较电抗要小,所以阻抗绝对值误差仍然比较小;因为求得单位长度导线 Y_0 的实部只有虚部的 0.1% 以下,所以只按照虚部计算分布电容值,其值与真值的误差也特别小。

随着线路长度的增加计算误差加大,原因可能是型等效集总参数模型带来的误差,因为型等效模型把充电电容电流等效为线路两端电压作用的

效果,而实际分布参数的电容电流是沿线变化的,这种差别会随着线路长度的增加而加大。

表 1 互感双回路分布参数仿真结果对比

Tab 1 Comparison of the results by simulation of two transmission lines with inductance

设定值	$L_m = 50$ km	误差	$L_m = 100$ km	误差	$L_m = 100$ km	误差
	$L = 100$ km		$L = 150$ km		$L = 200$ km	
$R_0 = 0.2296$ /km	0.2288	0.35	0.2308	-0.52	0.2327	-1.33
$L_0 = 3.6357e-3$ H/km	$3.6292e-3$	0.18	$3.6222e-3$	0.37	$3.6004e-3$	0.97
$R_{m0} = 0.1899$ /km	0.1891	0.42	0.1902	-0.18	0.1936	-1.94
$L_{m0} = 1.4597e-3$ H/km	$1.4597e-3$	-0.04	$1.4636e-3$	0.31	$1.4441e-3$	1.03
$ Z_0 = 1.1650$ /km	1.1629	0.19	1.1611	0.34	1.1548	0.88
$ Z_{m0} = 0.4962$ /km	0.4960	0.027	0.4976	-0.29	0.4932	0.59
$C_0 = 7.1307e-9$ F/km	$7.1367e-9$	0.083	$7.1372e-9$	0.091	$7.1391e-9$	0.12

4 结论

1) 输电线路零序参数必须实测,输电线路参数带电测量方法可以通过较少次数的测量得到互感线路的零序自参数和互参数,大大减少了线路的停电次数。

2) 根据输电线路首末端测量的电气量,然后计算得到的线路阻抗和导纳,不是一般意义上的阻抗和导纳,是一个包含了波过程的量。

3) 输电电路集总参数模型和分布参数模型可以相互转换,以满足工程上不同的需要。对于部分共互感线路,互感部分分布参数须单独考虑。

参考文献:

- [1] 陈允平,张承学,胡志坚. 以 GPS为基础的线路参数带电测量[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(6): 43-45.
CHEN Yun-ping, ZHANG Cheng-xue, HU Zhi-jian Zero-sequence Parameter Measurement Under Operation of Transmission Line with Mutual Inductance Based on GPS Technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(6): 43-45.
- [2] 张文涛,邱宇峰,郑旭军. GPS及其在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 1998, 22(6): 38-40.
ZHANG Wen-tao, QIU Yu-feng, ZHENG Xu-jun GPS and Its Application in Power System[J]. Power System Technology, 1998, 22(6): 38-40.
- [3] 邱关源. 现代电路理论[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
QIU Guan-yuan Modern Circuit Theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [4] 高中德. 超高压电网继电保护专题分析[M]. 北京:水利电力出版社, 1990.
GAO Zhong-de Analysis of EHV Network Relay Protection[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press,

- 1990.
- [5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:水利电力出版社, 1983.
ZHU Sheng-shi Theory and Technique of HV Network Relay Protection[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1983.
- [6] 胡志坚. 基于 GPS的互感线路参数带电测量研究与实现(博士学位论文)[D]. 武汉:武汉水利电力大学, 1999.
HU Zhi-jian Studying and Realization of Parameters Measurement Under Operation of Transmission Lines Based on GPS Technology, Doctoral Dissertation[D]. Wuhan: Wuhan Hydraulic and Electric Power University, 1999.
- [7] 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 Zhi-jian, LIU Mei-guan, ZHANG Cheng-xue, 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.
- [8] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
ZHANG Xian-da Modern Signal Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [9] 胡志坚,陈允平,等. 宁夏电网 220kV互感参数带电测量[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 41-44.
HU Zhi-jian, CHEN Yun-ping, 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(17): 41-44.

收稿日期: 2005-03-13; 修回日期: 2005-07-19

(下转第 49页 continued on page 49)

参考文献:

- [1] Bulow J, Roberts J. The Simple Economics of Optimal Auctions[J]. Journal of Political Economy, 1989, 97(5): 1060-1090.
- [2] Myerson R. Incentive Compatibility and the Bargaining Problem[J]. Econometrica, 1979, 47: 61-73.
- [3] Myerson R. Optimal Auction Design[J]. Mathematics of Operations Research, 1981, 6: 58-73.
- [4] Laffont J J, Tirole J. Auctioning Incentive Contracts[J]. Journal of Political Economics, 1987, 95: 921-937.
- [5] Maskin E, Riley J. A symmetric Auctions[J]. Review of Economic Studies, 2001, 67: 413-438.
- [6] Riley J G, Samuelson W F. Optimal Auctions[J]. American Economic Review, 1981, 71: 381-392.
- [7] Milgrom P R, Weber R J. A Theory of Auctions and Competitive Bidding[J]. Econometrica, 1981, 50: 1089-1122.
- [8] Hansen R. Auctions with Endogenous Quantity[J]. RAND Journal of Economics, 1988, 29: 44-58.

收稿日期: 2005-01-10; 修回日期: 2005-03-31

作者简介:

胡恩同(1974-),男,博士生,主要从事产业组织理论研究。E-mail: entongh@eyou.com

An optimum auction model in the bilateral monopolized power markets

HU En-tong

(China Center for Economic Studies, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: As a result of the generation and the transmission of power is separated and the price is formed at a competitive market, a bilateral-monopolized market appears. To compare the efficiency with the totally monopolized original mode, this paper constructs a bilateral-monopoly auction model and analyzes the expected utility and social welfare level brought to the power transmission company, the power generator and the power consumer. It's proved that the social welfare and efficiency is improved, but is not optimum. It indicates that the market-based reform should be insisted on, but the bilateral monopoly at present is not still a optimum mode and needs to break the monopoly and strengthen the competition further in the power generating and purchasing.

Key words: bilateral-monopoly; auction; power markets; optimization

(上接第 22 页 continued from page 22)

作者简介:

郭健全(1980-),男,硕士,主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: just_fine_gjq@sina.com

郭建新(1976-),男,长期从事电网调度与故障检测工作,主要研究方向为电力系统调度自动化与故障检测;

胡志坚(1969-),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统稳定控制与自动化。

Study and realization of zero-sequence distributed parameter live line measurement of transmission lines with mutual inductance

GUO Jian-quan¹, GUO Jian-xin², HU Zhi-jian³, ZHAN Feng³, HU Ning⁴

(1. Xingtai Power Company, Xingtai 054001, China; 2. Xingtai County Power Company, Xingtai 054001, China;

3. Department of Electrical Engineering, Wuhan 430072, China; 4. Yueyang Power Company, Yueyang 414001, China)

Abstract: Both the zero-sequence lumped parameters and the distributed parameters of the transmission line are needed for electrical engineering. Zero-sequence parameter measurement under operation can reduce the number of power cut and can meet the need of live line parameter measurement. Through synchronous measuring the voltage and current on the ends of the lines using GPS, this paper calculates the lumped parameters, then gets the distributed parameters considering the length of line and the length of the section with mutual inductance. The conversion formulae between the distributed parameter model and the lumped parameter model of transmission line are given, based on which, this paper brings forward a method of zero-sequence distributed parameters measurement under operation. And simulating tests are carried out to test this method.

Key words: GPS synchronous timing; transmission lines with mutual inductance; zero-sequence parameter; measurement under operation; distributed parameter