

文章编号:1001-1609(2005)06-0425-03

互感输电线路零序分布参数带电测量方法研究

郭建全¹, 胡志坚¹, 郭建新², 湛锋¹, 胡宁¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 河北省邢台县供电局, 河北 邢台 054000)

Study on Zero-sequence Distributed Parameter Live Line Measurement of Transmission Lines with Mutual Inductance

GUO Jian-quan¹, HU Zhi-jian¹, GUO Jian-xin², ZHAN Feng¹, HU Ning¹

(1. Department of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072 China;
2. Xingtai County Power Company, Xingtai 054000, China)

摘要: 电力工程上不但需要知道互感线路的零序集总参数,有时还需要知道分布参数。通过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。笔者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,提出了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了验证。

关键词: 参数带电测量; 零序; 分布参数; 集总参数; 输电线路

中国分类号: TM744

文献标识码: A

Abstract: Not only the zero-sequence lumped parameters of the transmission lines but also the distributed ones are needed to measure. Through synchronous measuring the voltage and current on the ends of the lines, the lumped parameters can be calculated, and the distribute parameters considering the length of line and the length of the section with mutual inductance can be obtained. First, the distributed parameter model and the lumped parameter model of transmission line are given. Then, the conversion formulae between each other are also given. Based on them, this paper brings forward a method of zero-sequence distributed parameters measurement under operation. Finally, the simulating tests are carried out to prove this method.

key words: parameter measurement under operation; zero-sequence; distributed parameter; lumped parameter; transmission line

1 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; 另外, 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。

2 输电线路分布参数和集总参数模型及二者之间的转化

2.1 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^[3-5]:

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 = R_0 + jX_0$$

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0 = G_0 + jB_0$$

传播常数:

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

波阻抗:

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

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, 见图 1。

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

当 $X=L$ 时, 可得线路首, 末端电压和电流之间的关系:

收稿日期: 2005-07-22; 修回日期: 2005-09-24

作者简介: 郭建全(1980-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用。

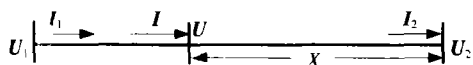


图1 输电线路分布参数模型

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

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:

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

由式(5)可以制定 II 型集中参数等值电路, 见图 2

图 2

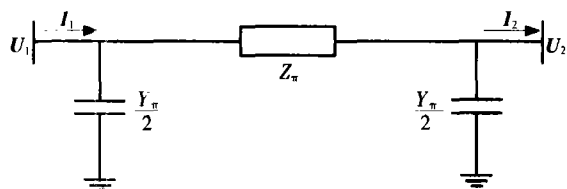


图2 输电线路 π 型等效集中参数模型

$$Z_\pi = B = Z_c \sinh(\gamma L) = Z_0 K_2 L \quad (6)$$

$$Y_\pi = \frac{2}{B} [A - 1] = \frac{2[\cosh(\gamma L) - 1]}{Z_c \sinh(\gamma L)} = Y_0 K_1 L \quad (7)$$

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

可以证明:

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

因为传播常数 γ 一般很小, 当线路长度 L 较短时(一般小于 100 km), γL 也较小, 可以认为: $K_1 \approx 1$, $K_2 \approx 1$, 这时, 式(6), 式(7)成为:

$$Z_\pi = Z_0 L \quad (8)$$

$$Y_\pi = Y_0 L \quad (9)$$

2.2 集总参数模型转化为分布参数模型

由式(6)和式(7)可得:

$$\gamma = \frac{\cosh^{-1}\left[1 + \frac{Z_\pi Y_\pi}{2}\right]}{L} \quad (10)$$

因为: $B = Z_\pi = Z_c \sinh(\gamma L)$, $C = (1 + \frac{Z_\pi Y_\pi}{4}) Y_\pi =$

$\frac{\sinh(\gamma L)}{Z_c}$, 所以可以得到:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_\pi}{(1 + \frac{Z_\pi Y_\pi}{4}) Y_\pi}} \quad (11)$$

由式(1)和式(2)可得:

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

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

在线路长度较短时, 可以按下式计算:

$$Z_0 = Z_\pi / L \quad (14)$$

$$Y_0 = Y_\pi / L \quad (15)$$

式中: Z_π 和 Y_π 是与传输常数有关的, 即 Z_π 和 Y_π 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 π 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), 式(9), 式(14), 式(15)近似计算, 即可满足工程需要的准确度。

3 互感线路零序参数带电测量方法

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。

3.1 互感双回路零序集总参数带电测量方法

建立集中参数模型见图 3, 如计及充电电容的影响时, 可以先通过试验线路开路求得电容, 通过改变互感线路系统的运行方式, 得到足够的方程解出参数。

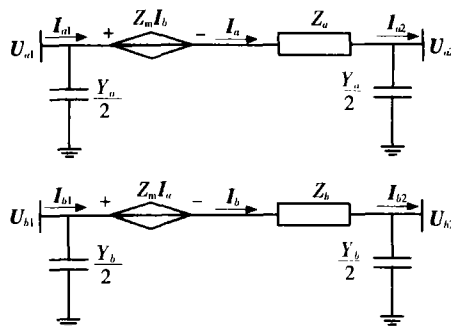


图3 双回互感线路 π 型集中参数模型

每次改变运行方式, 须同步测量改变前和改变后的电压和电流相量, 分别记为: $U_{a1}, U_{a2}, U_{b1}, U_{b2}, I_{a1}, I_{a2}, I_{b1}, I_{b2}$, 和 $U_{a1}', U_{a2}', U_{b1}', U_{b2}', I_{a1}', I_{a2}', I_{b1}', I_{b2}'$, 见图 3。

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

满足方程:

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

或:

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

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

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

可以看到,式(16),式(17)或式(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:

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta U_a^{(1)} & \Delta U_a^{(2)} \\ \Delta U_b^{(1)} & \Delta U_b^{(2)} \end{bmatrix}; \Delta I = \begin{bmatrix} \Delta I_a^{(1)} & \Delta I_a^{(2)} \\ \Delta I_b^{(1)} & \Delta I_b^{(2)} \end{bmatrix}; Z = \begin{bmatrix} Z_a & Z_m \\ Z_m & Z_b \end{bmatrix}$$

式中:带括号的上标为测量次数的编号;下标为线路号; ΔI 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: $\Delta U = Z \Delta I$,用最小二乘估计^[8]可以解出:

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

3.2 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:

$$\Delta U^{(i)} = [\Delta U_1^{(i)}, \Delta U_2^{(i)}, \dots, \Delta U_n^{(i)}]^T$$

$$\Delta I^{(i)} = [\Delta I_1^{(i)}, \Delta I_2^{(i)}, \dots, \Delta I_n^{(i)}]^T$$

对于准确计算, $\Delta I^{(i)}$ 是如式(16)或式(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:

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

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

阻抗矩阵为:

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix}$$

式中:对角线元素为自阻抗,非对角线元素为互阻抗,且 $z_{ij} = z_{ji} = z_{nij}$,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:

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

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准确度,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]。

3.3 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)~式(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),式(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)~式(13)求得 Z_{m0} ;对于较短的 L_m ,可直接用式(14)计算。

4 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,仿真结果见表1。

误差表示为:

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

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

表1 互感双回路分布参数仿真结果对比

| 设定值 | $L_m=50$ | | | $L_m=100$ | | | $L_m=150$ | | | $L_m=200$ | | |
|--|-------------------------|-------|-------------------------|-----------|-------------------------|-------|-----------|----|---------|-----------|--|--|
| | $L=100$ | 误差 | $L=150$ | 误差 | $L=200$ | 误差 | $L=250$ | 误差 | $L=300$ | 误差 | | |
| $R_0=0.22296/(\Omega \cdot km^{-1})$ | 0.2288 | 0.35 | 0.2308 | -0.52 | 0.2327 | -1.33 | | | | | | |
| $L_0=3.6357 \times 10^{-3}/(H \cdot km^{-1})$ | 3.6292×10^{-3} | 0.18 | 3.6222×10^{-3} | 0.37 | 3.6004×10^{-3} | 0.97 | | | | | | |
| $R_{m0}=0.1899/(\Omega \cdot km^{-1})$ | 0.1891 | 0.42 | 0.1902 | -0.18 | 0.1936 | -1.94 | | | | | | |
| $L_{m0}=1.4597 \times 10^{-3}/(H \cdot km^{-1})$ | 1.4597×10^{-3} | -0.04 | 1.4636×10^{-3} | 0.31 | 1.4441×10^{-3} | 1.03 | | | | | | |
| $ Z_0 =1.1650/(\Omega \cdot km^{-1})$ | 1.1629 | 0.19 | 1.1611 | 0.34 | 1.1548 | 0.88 | | | | | | |
| $ Z_{m0} =0.4926/(\Omega \cdot km^{-1})$ | 0.4960 | 0.027 | 0.4976 | -0.29 | 0.4932 | 0.59 | | | | | | |
| $G_0=7.1307 \times 10^{-9}/(F \cdot km^{-1})$ | 7.1367×10^{-9} | 0.083 | 7.1372×10^{-9} | 0.091 | 7.1391×10^{-9} | 0.12 | | | | | | |

抗绝对值误差仍然比较小;因为求得单位长度导纳 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 π 型等效集总参数模型带来的误差,因为 π 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,该差别会随着线路长度的增加而加大。(下转第440页)

其它两相暂时不切换的情况。可见三相储能结构动作所需传动轴转动的圈数并不一样,从而造成三相开关切换有先有后。分析认为,有载分接开关的分接变换动作是一个电流的转换过程,对三相分接开关来说,即使在切换过程中某一相先动作,电流仍在该相的电路通过,因此三相触头分合的先后,对相互之间的切换电流没有明显的影响。另外,有载分接开关在切换过程中产生的电弧都是采用电流过零点自然熄弧的方式,而不是像断路器那样采用强迫熄弧的方式,这样分接开关三相触头的电弧熄灭本身就存在先后,所以其机械动作的先后差别不会影响有载分接开关的正常运行。该有载分接开关试验后投入运行,至今已将近两年,期间切换多次,无任何不正常现象。

5 结语

有载分接开关是变压器上一个重要的部件,通

过其切换波形的测试可以看出切换开关能否正确动作,进而判断有载分接开关是否存在电动机构动作异常、绝缘筒变形、触头烧损、传动轴断裂等故障。现场试验中由于种种原因,所测得的切换波形很难与标准波形完全吻合。所以试验人员在测试前,应该尽量多切换几次,减少油膜对测试结果的影响。在准确测量的前提下,正确分析测试波形与标准波形产生差异的原因,同时结合变压器其他相关试验的结果,综合考虑,得出正确的结论。

参考文献:

[1] 陈敢峰,姚集新. 变压器分接开关实用技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
[2] 冯仲民. 有载分接开关的应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
[3] DL/T574-1995. 有载分接开关运行维修导则[S].

(上接第 437 页)

参考文献:

[1] Discussion Group 13. Synthetic Circuit for Making Tests [A]. in CIGRE Conference[C], Paris, CIGRE, 1966: 444-445.
[2] CIGRE WG 13.04. Requirements for Testing Making Performance of High-voltage Circuit-breakers at Reduced Applied Voltage [J]. Electra 1979, 66(10): 27-33.
[3] IEC62271-100: 2001. High-voltage Alternating Current Circuit Breakers[S].
[4] GB1984-2003. 高压交流断路器[S].
[5] Aldrovandi G, Bonfanti I, Kuhnhardt G, et al. New Application of Synthetic Circuit Development in CESI and IPH[A]. CIGRE Session 1992[C], Paris, CIGRE, 1992: 201.
[6] 庄稼人, 党晓鹰. 在最大预燃弧条件下进行关合试验的合成关合回路[J]. 高压电器, 1992, 28(3): 14-20.

[7] Sheng B L. Design Consideration of Weil-dobke Synthetic Testing Circuit for the Interrupting Testing of HV AC Circuit Breakers [A]. Power Engineering Society Winter Meeting[C], IEEE, 2001(1): 295-299.
[8] 方春恩. 同步真空开关的相关理论及其应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
[9] Suiter H. Consequences of Controlled Switching for System Operation and Circuit Breaker Behavior [A]. CIGRE Session 1990[C], Paris, CIGRE, 1990: 202.
[10] Dick E P, Fischer D. Point-on-wave Capacitor Switching and Adjustable Speed Drives [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(13): 1367-1372.
[11] CIGRE WG 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers Guide for Application [J]. Electra, 1999, 183(4): 43-73.

(上接第 427 页)

5 结语

(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, 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, 而是一个包含了波过程量。

(3) 输电线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.

[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.
[3] 邱关源. 现代电路理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 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.
[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.
[6] 胡志坚. 基于 GPS 的互感线路参数带电测量研究与实现[D]. 武汉: 武汉水利电力大学博士学位论文, 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.
[8] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
[9] 胡志坚, 陈允平. 宁夏电网 220 kV 互感参数带电测量 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 41-44.