

文章编号:1001-1609(2006)01-0035-03

架空输电线路零序参数干扰法的研究与实现

洪珠琴¹, 章碧波², 金涌涛³, 陈允平¹, 龚晓琴¹, 钟洲文¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 浙江富阳市电力局, 浙江 富阳 311400;
3. 浙江电力试验研究所, 浙江 杭州 310009)

Study and Realization of Zero-sequence parameters Interference of Overhead Transmission Lines

HONG Zhu-qin¹, ZHANG Bi-bo², JIN Yong-tao³, CHEN Yun-ping¹, GONG Xiao-qin¹, ZHONG Zhou-wen¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Zhejiang Fuyang Power Company, Fuyang 311400, China; 3. Zhejiang Electric Power Test and Research Institute, Hangzhou 310009, China)

摘要: 运用电报方程推导出零序耦合传输线的输线方程。简要介绍了可用于互感线路零序参数测量的干扰法的理论基础,在架空输电线路终端开路 and 短路的条件下,采用了以起端电压相量和电流相量来确定架空输电线路零序波参数的原理和方法,并且首次以干扰法实现了对东北电网两条 500 kV 同杆架设输电线路的工频参数测量。通过在实际线路上的测试实验表明,干扰法正确有效,现场测试简单,测量结果完全满足工程的要求。

关键词: 耦合传输线; 波参数; 零序参数; 干扰法

中图分类号: TM726

文献标识码: A

Abstract: The equations of zero-sequence coupling transmission lines are derived from telegraph equations. Theory of interference method is introduced briefly. This method is a new one which can be used in measuring zero-sequence parameters of transmission lines with mutual inductance. The principle and method are used that the zero sequence parameters of overhead transmission lines are determined by using voltage and current vectors at the initial terminal, under the conditions of open and short circuit at the end terminal of overhead transmission lines. Interference method is first used to measure power frequency parameter of two 500 kV transmission lines in Northeast network. Measuring experiment performed on practical transmission lines shows that this method is effective and easy to do on-site. The results meet the requirements of the transmission project.

Key words: coupling transmission line; wave parameter; zero sequence parameter; interference method

1 引言

随着电力系统规模的发展,电力工业对安全运

行的要求也是越来越高。由于电厂(变电站)的出线增多,使得新旧线路同杆,公走廊和部分公走廊,线路之间的电磁耦合日益严重。

电力线路参数测量,传统上采用人工施加测量电源、搭建测量电路的方法,其共同点是离线测量^[1-2]。对于某些重要的长距离高压传输线,停电进行参数测量是不允许的,而且电力传输线在正常运行时的电压一般要比测量时所加测量电源的电压高很多,考虑到线路实际运行时温度以及导线集肤效应等因素,其参数与离线测量时往往不同。

利用文[3]中的干扰法测量理论,建立了合理的数学模型,根据零序电压、零序电流大小相等、方向相同的特点,将模型合理简化;对简化后的单相-地耦合传输线的电路模型,以电报方程为基础,推导其数学模型并求解;在这个基础上,提出一种新的在线测量零序参数的原理及方法;通过仿真实验对所提出的方法进行验证;并实现了对东北电网两条 500 kV 的同杆架设输电线路工频参数的测量。

2 干扰法基本原理

2.1 零序分量输电线路

一条实际的输电线,其参数是分布的,尤其是线路较长、电压等级较高、信号波长与线长可比时,应作为分布参数电路处理。笔者研究的线路为等边三角形均匀换位架空线路,在该架线方式下,其分布参数电路模型为三线-地耦合传输线模型。

三相线路沿线的布置、周边介质处处一致,则线路参数是均匀分布的。每回线路内部有电阻、自感,相间有互阻抗、漏电导和耦合电容,线地之间也有漏电导和电容。若在耦合传输线的物理模型上取一长

收稿日期:2005-08-30; 修回日期:2005-10-10

作者简介:洪珠琴(1981-),女,浙江富阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定控制。

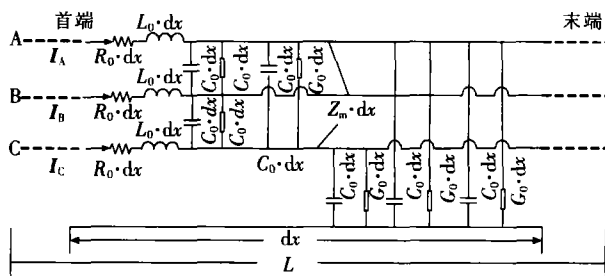


图1 三相-地耦合传输线电路模型

度为 dx 的微元，在此微元上忽略参数的分布特性，便可以用集中参数电路来代替，如图1所示。当微元长度 dx 趋于零时，该模型可以准确地描述线路的电气特性。考虑线路中的零序分量的时候，零序电压，电流满足如下的关系：

$$\begin{cases} U_A^{(0)} = U_B^{(0)} = U_C^{(0)} \\ I_A^{(0)} = I_B^{(0)} = I_C^{(0)} \end{cases} \quad (1)$$

所以在零序参数的测量中可用单相等值电路代表三相，一方面讨论的是三相对称运行方式，另一方面也因架空线路都已经整循环换位。另外考虑到零序电气量的特点：电压、电流大小相等，方向相同，所以每回线路都可以用一相来代替，这样就将三相零序参数的模型合理简化成简单的单相-地的耦合传输线模型，见图2。

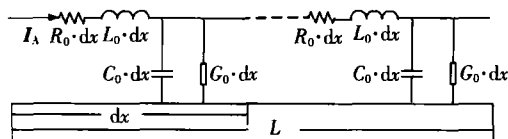


图2 简化的单相-地耦合传输线电路模型

其中： R_0, L_0, G_0, C_0, L ，分别为单位长度(km)的电阻、电感、线地间电导、线地间电容、线路的长度。单位长度(km)的阻抗和导纳分别为： $Z_0 = R_0 + j\omega L_0 = R_0 + jX_0$ ； $Y_0 = G_0 + j\omega C_0 = G_0 + jB_0$ 。

对该模型列写电报方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial u_a}{\partial x} = R_0 i_a + L_0 \frac{\partial i_a}{\partial t} \\ \frac{\partial i_a}{\partial x} = R_0 u_a + C_0 \frac{\partial u_a}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

当各电压电流为正弦量时，可以写成如下相量形式：

$$\begin{cases} \frac{dU_a}{dx} = (R_0 + j\omega L_0) I_A \\ \frac{dI_a}{dx} = (G_0 + j\omega C_0) U_A \end{cases} \quad (3)$$

设线路起端A相的零序电压、电流分量分别 $U_{A1}^{(0)}$ 和 $I_{A1}^{(0)}$ ，可列出距离线路首端 x 处的电压和电流和A相的零序传输线方程：

$$\begin{cases} U_A^{(0)} = U_{A1}^{(0)} \operatorname{ch} \gamma_0 x - I_{A1}^{(0)} Z_{C0} \operatorname{sh} \gamma_0 x \\ I_A^{(0)} = I_{A1}^{(0)} \operatorname{ch} \gamma_0 x - \frac{U_{A1}^{(0)}}{Z_{C0}} \operatorname{sh} \gamma_0 x \end{cases} \quad (4)$$

当 $x=L$ 时，可得线路A相首、末端零序电压和电

流之间的关系：

$$\begin{cases} U_A^{(0)} = U_{A1}^{(0)} \operatorname{ch} \gamma_0 L - I_{A1}^{(0)} Z_{C0} \operatorname{sh} \gamma_0 L \\ I_A^{(0)} = I_{A1}^{(0)} \operatorname{ch} \gamma_0 L - \frac{U_{A1}^{(0)}}{Z_{C0}} \operatorname{sh} \gamma_0 L \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\gamma_0 = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \sqrt{(Z_0 Y_0)}$ ； $Z_{C0} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)} = \sqrt{(Z_0/Y_0)}$ 。 γ_0, Z_{C0} 分别为耦合传输线路的零序传播常数和零序波阻抗，是耦合传输线的二次参数， L 为线路的长度。

2.2 干扰法零序波参数的测试

在线路的零序参数测量时，常会出现多回线路并行或有并行段，而在测试时除了被测线路外，其它线路不能停电以至对被测线路造成较大的纵向感应电动势，即干扰信号。因为系统频率为工频，所以，干扰源也以工频为主。有时干扰很大，甚至可达到上百伏，甚至超过所加的试验电源电压。

在这种情况下，干扰信号的影响就不能不考虑，有的单位是利用外加电源补偿法或是电源倒极性测试法，但是在实际的测量中，以上的两中方法都是有不足的。原因是：在干扰很大的情况下，由于电源和试验装置内阻的存在，倒相前后的电压相角是有偏差的，不会正好是 180° ，且偏差是随着干扰的增大而增大。

由于干扰信号的出现，也可以认为被测线路成为有源网络。由于测量系统是一个线性系统，满足叠加原理。为干扰信号存在时测量零序参数提供了一个很好的条件；利用这个干扰电源为试验电源，去掉外加电源，直接测量出零序参数，这就是干扰法的基本原理。零序波参数的测试电路见图3。

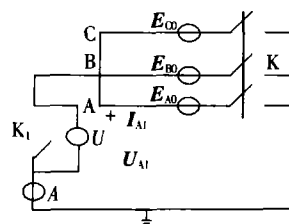


图3 零序波参数测试电路

若分别检测到的 K_1 开路时的电压相量 $U_{A1}^{(0)}$ ，闭合时的电流相量 I ，则对于A相而言：

$$U_{A1}^{(0)} = E_{A1}^{(0)}, I_{A1}^{(0)} = I/3$$

线路长度为 L ，令 K 断开，则终端开路， K_1 开路得到的 $U_{A1}^{(0)}$ ， K_1 闭合得到的 $I_{A1}^{(0)}$ ，分别用 $E_{A10}^{(0)}$ 和 $I_{A10}^{(0)}$ 表示。

由式(5)得到：

$$I_A^{(0)} = I_{A10}^{(0)} \operatorname{ch} \gamma_0 L - \frac{E_{A10}^{(0)}}{Z_{C0}} \operatorname{sh} \gamma_0 L = 0 \quad (8)$$

即：

$$Z_{C0} = \frac{E_{A10}^{(0)}}{I_{A10}^{(0)}} \operatorname{th} \gamma_0 L \quad (9)$$

令 K 闭合，则终端短路， K_1 开路得到的 $U_{A1}^{(0)}$ ，闭合得到的 $I_{A1}^{(0)}$ ，分别用 $E_{A1S}^{(0)}$ 和 $I_{A1S}^{(0)}$ 表示。

由式(5)得到:

$$U_A^{(0)} = U_{AIS}^{(0)} \operatorname{ch} \gamma_0 L - I_{AIS}^{(0)} Z_0 \operatorname{sh} \gamma_0 L = 0 \quad (10)$$

即:

$$Z_0 = \frac{E_{AIS}^{(0)}}{I_{AIS}^{(0)}} \frac{1}{\operatorname{th} \gamma_0 L} \quad (11)$$

由式(9),式(11)便可以求得 γ_0 和 Z_0 ,由式(6),式(7)可以求出单位长度的 R_0, L_0, G_0, C_0 。

以上的算法中要注意的是:公式中在同一状态时的电压和电流的必须是具有统一参考基准,即为同步相量。在相量的计算时是用递推傅里叶的算法^[4]使电压和电流的相量达到同步的。

3 干扰法现场测量零序参数实例

用干扰法测量零序参数的方法已经成功地应用于东北电网南雁 500 kV 线路零序参数的带电测量中,被测互感线路组示意图见图 4。互感线路的实际情况是:两条 500 kV 线路为新建停电线路(图中线路 1 和线路 2),而 5 条 220 kV 线路(图中线路 3,4,5,6 和 7)处于运行状态,并且线路 1,2 与线路 3,4 有 1.5 km 为同塔四回线架设(国内首条 500 kV 同塔四回线),线路 1,2 与线路 5,6 有 4.3 km 为同塔四回线架设,各线路的长度见图中标注。在其它线路正常运行的情况下,利用干扰法测量新建线路南雁甲乙线路的零序参数。

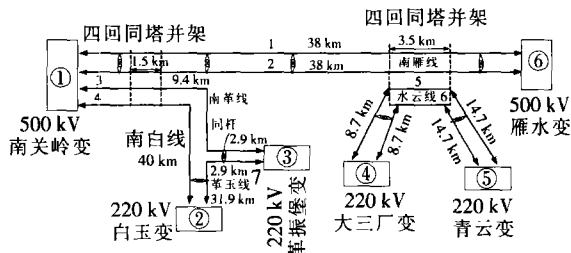


图 4 被测互感线路示意图

从现场的干扰电压和干扰电流的初步测量来看,运行线路对南雁甲乙两条停电线路的干扰较大并且也较稳定,实现干扰法的测量是可能的。现场利用干扰信号测量零序基波参数的测量接线见图 5。

在试验中测量得到的电压和电流的数据(局部波形)如图 6~图 11 所示,幅值频谱见图 12~图 13。从现场采集的零序电压、零序电流看,K 断开时的零序电流和 K 闭合时的零序电压的谐波较为严重,并且都是高次谐波。在离线零序参数计算时,用递推傅里叶的算法^[4]求解零序基波的幅值和初相角。再根据式(6),式(7),式(9),式(11)计算零序参数。为了使测量出来的数据有比较性,用相同的方法进行了多次的重复测量,结果基本一致,见表 1,表 2。在这次试验中,还采用了加压法对南雁甲乙两条线进行了测量,具体的测量方法和步骤在文[5-6]中有详细叙述,本文从略。

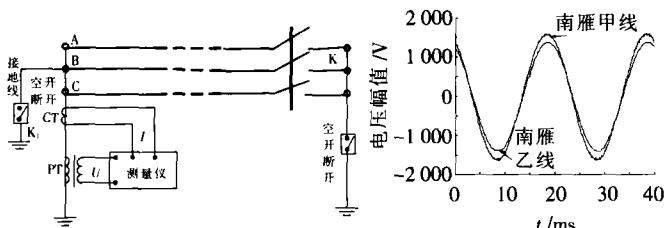


图 5 零序波参数现场测试电路图

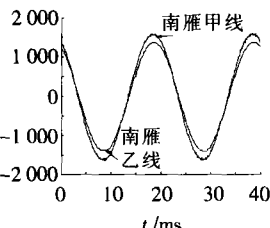


图 6 南雁甲乙线 K 断开时的零序电压

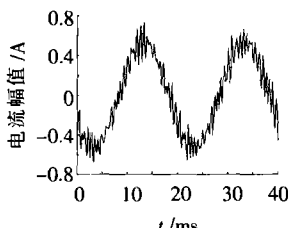


图 7 南雁甲线 K 断开时的零序电流

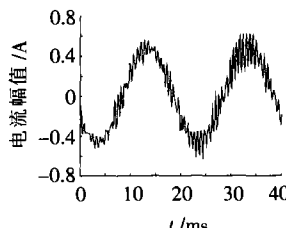


图 8 南雁乙线 K 断开时的零序电流

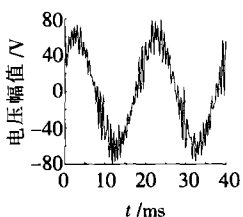


图 9 南雁甲线 K 闭合时的零序电压

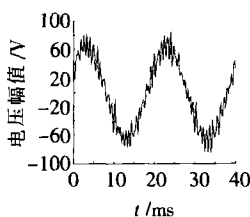


图 10 南雁乙线 K 闭合时的零序电压

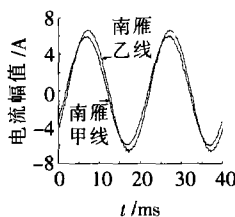


图 11 南雁甲乙线 K 闭合时的零序电流

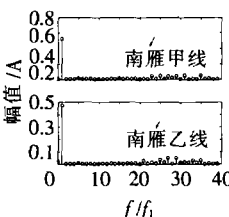


图 12 南雁甲乙线 K 断开时的零序电流幅值频谱

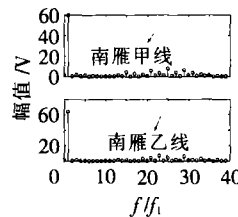


图 13 南雁甲乙线 K 闭合时的零序电压幅值频谱

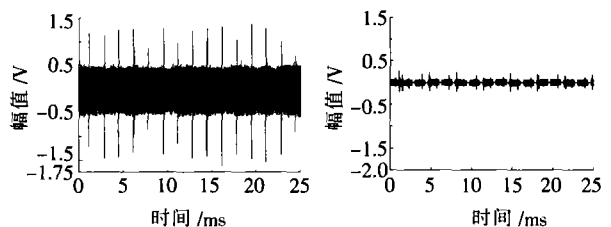
比较表 1 和表 2 的结果可知,采用增量法得到南雁甲乙线路的零序参数测量结果与干扰法的测量结果十分吻合,而且重复多次测量的结果一致性很好。从而间接证明了干扰法的正确性。知道利用干扰法可以得到正确的零序参数,所以在干扰比较大,而且比较稳定的情况下建议直接采用干扰法,不需要采用外加电源的方法。

4 结果误差分析

相量测量,特别是相角测量的准确度受到多个因素的影响:相量计算方法的设计、A/D 转换精度、电流/电压互感器(CT/PT)的幅值误差和相位误差、CT/PT 的磁路饱和和非线性、机组和线路或变压器的阻抗参数等,其中 CT/PT 引起的误差占有很大比重,CT/PT 产生的时间延迟,系统 (下转第 41 页)

据现场运行经验,电缆发生直流局放,泄漏电流变大,绝缘性能开始下降后,仍可安全运行一段时间(几天到十几天)。监测系统对现场采集到的直流局放和泄漏电流实时信号进行分析,并与历史数据进行对比,分析数据变化趋势,可作到提前预警。

现场对直流局放进行监测,采集到的原始信号时域波形见图11(a),主要为白噪声和周期性的脉冲干扰,对信号进行处理后时域波形见图11(b),没有发现直流局放脉冲信号。



(a)原始信号时域波形 (b)信号处理后时域波形
图11 现场直流局放监测信号

现场某日监测到的泄漏电流数据见表1,由此根据欧姆定理折算出的电缆对地绝缘电阻表明,被监测电缆绝缘状况满足运行要求。

6 结语

该系统通过监测直流电缆局部放电和泄漏电流来综合评估电缆绝缘状况。运行结果表明,该系统能

表1 现场监测到的泄漏电流数据

	最大值/ μA	平均值/ μA
NC21-1	43.6	41.8
NC21-2	47.2	45.9
NC21-3	35.7	32.1
NC21-4	44.3	42.7
NC21-5	38.4	37.6
NC21-6	43.5	43.2
NC22-1	52.3	51.4
NC22-2	49.4	48.3
NC22-3	33.0	32.3
NC22-4	33.6	31.4
NC22-5	42.5	40.3
NC22-6	37.7	35.9
NC31-1	29.1	27.5
NC31-2	37.5	34.8
NC31-3	32.4	30.1

满足1.5 kV直流电缆绝缘在线监测的要求。为直流电缆实现状态维修起到了有力的推动作用。

参考文献:

- [1] 严 璋. 电气绝缘在线检测技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] 杨 莉. 高压直流设备中局部放电的识别[J]. 高压电器, 1998, 34(3): 48-51.
- [3] 马翠姣. 局部放电检测用宽频带电流传感器的研讨[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 24-26.

(上接第37页)

表1 干扰法的实测及计算结果

测量 次数	甲线 $Z_0/(\Omega/\text{km})$	甲线 $C_0/(\mu\text{F}/\text{km})$	乙线 $Z_0/(\Omega/\text{km})$	乙线 $C_0/(\mu\text{F}/\text{km})$
1	0.208 7+j0.761 6	0.009 183	0.187 4+j0.745 0	0.009 270
2	0.208 5+j0.766 4	0.009 003	0.193 1+j0.743 5	0.009 329
3	0.209 2+j0.758 6	0.009 020	0.190 5+j0.743 6	0.009 203
4	0.202 6+j0.759 1	0.008 951	0.192 4+j0.741 4	0.009 309
5	0.205 5+j0.769 3	0.009 305	0.192 3+j0.743 5	0.009 329

表2 增量法测量及计算结果

零序阻抗	甲线 $Z_0/(\Omega/\text{km})$	乙线 $Z_0/(\Omega/\text{km})$
南雁甲线	0.204 1+j0.756 5 ^①	0.1557+j0.401 6
南雁乙线		0.1914 j0.746 7 ^②

注:①为线路的零序自阻抗,其余为零序互阻抗。

CT/PT的过渡过程也会在二次侧的数据中出现衰减的非周期分量。

5 结语

笔者提出的基于简化的零序单相-地构成耦合传输线,干扰法测量零序波参数测量原理和方法,建立在严格的物理模型和数学推导的基础上,并通过

大连电网两条500 kV线路参数的现场测试验证有效。它简化了输电线路工频参数的测量工作并有利于提高测量准确度,尤其是对新建线路的测量十分有效。从测量过程看,该方法省时省力,对电网的安全运行没有影响,而且得到的零序参数结果完全满足工程要求。

参考文献:

- [1] 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, 2001.
- [2] 卢 明, 宁玉红, 马扶予, 等. 架空输电线路工频参数的测量及分析[J]. 高压电器, 2004, 40(3): 218-226.
- [3] 陈允平, 王旭蕊, 韩宝亮. 互感线路零序带电测量的理论及其微机实现[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(2): 38-42.
- [4] 高厚磊, 江世芳, 贺家李. 利用卫星时间作基准的电力系统同步相量测量[J]. 电力系统及其自动化学报, 1995, 7(4): 34-36.
- [5] 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, 18.
- [6] 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.