

高压架空输电线路工频正序参数测量方法仿真

白日昶¹, 帅玲玲¹, 张承学², 李海涛², 孙元博²

(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: 对架空输电线路的工频正序参数测量方法进行了分析比较。根据架空输电线路长度的不同对其相应的等值电路进行了相关理论分析, 并根据基于数字法测量原理进行了计算推导, 选出与频率相关的相域模型作为高压架空输电线路模型。构建出基于 PSCAD 软件平台的仿真模型, 利用 PSCAD 对模型进行仿真, 比较不同工频正序参数测量方案的仿真结果。针对是否采集输电线路末端电流的 2 种情况分别计算了模型的正序阻抗, 对计算结果与理论值的偏差进行分析得出了不同测量方法的适用范围: 输电线路长度小于 100 km 时, 可以仅采集线路首端电压和电流量, 计算结果能够满足工程要求; 输电线路长度大于 100 km 时, 应同时采集线路末端电流量, 所得结果比较精确。

关键词: 架空输电线路; 工频参数测量; PSCAD; 相域模型; 误差分析

中图分类号: TM 930.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0068-04

0 引言

输电线路的工频参数主要包括正序阻抗、零序阻抗、正序电容、零序电容、互感阻抗等。这些参数是进行电力系统潮流计算、故障分析、网损计算和继电保护整定计算等所必需的参数^[1-2]。输电线路工频参数的获取主要有理论计算、查手册、实际测量 3 种方式。相比之下, 实际测量能够较好地消除地理环境、气候条件等因素的影响, 得到比较精确的结果^[3-7]。所以, 对新建及改造的电力线路工频参数, 工程上要求对其进行实际测量^[8-11]。

传统的线路参数测量方法是仪表法, 这种方法存在使用表计多, 接线复杂, 人工记录及计算工作量大且易引起误差等问题。数字法通过对被测信号进行交流采样, 并对采样数据进一步处理和计算, 得到线路参数。该方法可有效克服仪表法的缺陷, 实施方便, 提高测量精度^[12-13]。

本文基于数字法测量原理, 通过建模仿真, 比较不同工频正序参数测量方案仿真结果, 得到满足工程要求前提下各种方案的适用范围。

1 输电线路的等值电路

输电线路各参数实际上是沿线均匀分布的, 设单位长度的电阻、电感、电导、电容分别为 R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 , 则线路的分布参数等值电路如图 1 所示^[14]。

图 1 中, 若已知线路首端的电压相量 U_1 和电流相量 I_1 及末端的电压相量 U_2 和电流相量 I_2 , 根据长

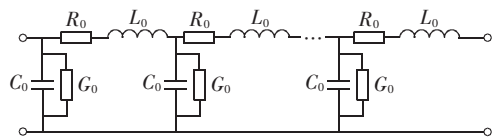


图 1 输电线路分布参数等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of transmission line with distributed parameters

线基本方程的稳态解可知:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{ch}(\gamma l) & Z \text{sh}(\gamma l) \\ \text{sh}(\gamma l)/Z & \text{ch}(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, γ 为传播系数, Z 为波阻抗, l 为线路长度, 且:

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \\ Z &= \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) / (G_0 + j\omega C_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

分布参数等值电路同时考虑电阻、电抗、电导、电纳共 4 个参数, 是最精确的电力线路模型, 但由于其计算比较复杂, 在工程实际应用中, 常采用简化的集中参数等值电路。

若架空输电线路长度小于 100 km 或不长的电缆线路, 且在工作电压不高的情况下, 可以忽略线路电导和电纳的影响, 采用电阻及电感串联等值电路, 如图 2 所示。

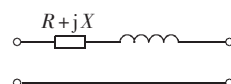


图 2 电阻及电感串联等值电路

Fig.2 Equivalent circuit with resistance in series with inductance

若架空输电线路长度在 100~300 km 之间或长度小于 100 km 的电缆线路, 可忽略电导的影响, 采用集中参数的 Π 型和 T 型等值电路, 如图 3、4 所示^[6], 图中 B 为电力线路电纳(容纳)。

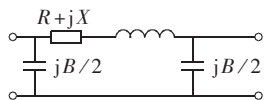
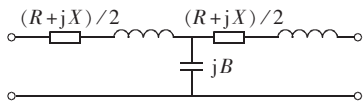
图 3 输电线路 Π 型等值电路Fig.3 Π -type equivalent circuit of transmission line

图 4 输电线路 T 型等值电路

Fig.4 T-type equivalent circuit of transmission line

上述集中参数的模型由于未完全考虑电导和电纳的影响,对工频正序参数的测量计算而言,若采用上述集中参数等值模型,必然会对正序电阻及正序电感的测量结果引入误差,此误差为模型误差,难以通过算法的改进消除。因此,需选择较精确的分布参数等值电路作为输电线路模型来进行工频正序参数的仿真计算。

2 模型的建立

利用 PSCAD/EMTDC 软件作为仿真平台,构建仿真模型。首先要选取输电线路模型,针对传输线和电缆的仿真研究,PSCAD 提供了集中参数的 Π 型等值模型和分布参数模型,分布参数模型又包含了贝杰龙(Bergeron)模型、频率相关的模域模型、频率相关的相域模型。

上述 4 种模型中, Π 型等值模型一般适用于长度小于 15 km 的输电线路仿真;贝杰龙模型适用于工频负荷潮流的计算仿真,可等效为多个 Π 型节的串联,且 Π 型节数量与线路长度相关,其电阻仍为集中参数;对于 2 种与频率相关的模型,模域模型假设传输过程恒定不变,而相域模型则包含了和频率相关的内部传输矩阵,因此更为精确。事实上,相域模型是迄今为止世界上最精确和强健的有效线路模型。因此,本文所采用的线路模型为与频率相关的相域模型。

相域模型需要设置线路的几何参数,其参数设置为:3 根导线水平排列,相间距离 3 m;导线高度 11.7 m;导线弧垂 3.5 m;导线半径 0.009 4 m;线路长度 50 m;频率 50 Hz。

此外,还需设置线路单位长度的并联电导值和单位长度的直流电阻:

$$\begin{cases} G_0 = 1.0 \times 10^{-7} \text{ S/km} \\ R_0 = 0.17 \text{ } \Omega/\text{km} \end{cases} \quad (3)$$

设置完线路参数后,可以手工编译,在输出文件界面得到软件计算的线路的正序阻抗理论值:

$$\begin{cases} R_0 = 0.170483548 \text{ } \Omega/\text{km} \\ G_0 = 1.0 \times 10^{-7} \text{ S/km} \\ C_0 = 9.33219982961 \times 10^{-9} \text{ F/km} \\ L_0 = 0.00125022674901 \text{ H/km} \end{cases} \quad (4)$$

在 PSCAD 下建立正序参数测量模型,并设置电

源的参数为:系统基准容量 $S = 1 \text{ MV} \cdot \text{A}$;频率 $f = 50 \text{ Hz}$;电压源基准电压 $U_N = 1 \text{ kV}$;电源内电阻 $R_g = 1 \text{ } \Omega$ 。测量架空线路首端的三相电压、电流和末端的三相电流。通过 PSCAD 的测量及图形元件可显示上述 9 个量的仿真波形,并将仿真结果形成数据文件输出。数据文件所含数据即为上述 9 个量的采样值。设置仿真时间 $t_{\text{RUN}} = 0.3 \text{ s}$;仿真步长 $t_{\text{step}} = 50 \text{ } \mu\text{s}$;采样周期 $T = 100 \text{ } \mu\text{s}$,即采样频率 $f_s = 10 \text{ kHz}$,故在仿真过程中对每个电参数会采集 3 000 个点。对包含采样点的数据文件用 Matlab 软件进行傅里叶算法分析计算,即可得到每个电量的幅值和相角,然后进一步采用正序参数的测量计算方法计算线路的正序参数。

3 测量方法对比

第 2 节中所示线路模型正序参数测量方法是线路首端加电源,末端三相短路接地,由测量元件模块测量线路首端的三相电压值、三相电流值以及线路末端的三相电流值,通过示波器显示波形,并将数据导入 Matlab 的工作区,通过编程采用傅里叶算法求取首端三相电压和三相电流的幅值和相角,然后计算各相的正序阻抗值,最后求取平均值得到系统的正序阻抗。

简化的正序阻抗测量计算方法是仅需获取线路首端的电压和电流向量。计算公式为

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = U_1 / I_1 \quad (5)$$

显然,这种计算线路正序阻抗的方法存在着模型误差,因为其未考虑线路的分布电容和电导的影响,故需要通过仿真来得到其满足工程要求的适用范围。

另一种方法是同时考虑测量线路末端的电流 I_2 ,且由于末端三相短接,电压 $U_2 = 0$,这样,线路首末端的电压和电流值都可得到。可以利用式(1)(2),首先求得传播系数 γ 和波阻抗 Z ,然后进一步计算得到线路的正序参数^[7]。该方法同时考虑了分布电容和电导的影响,模型误差较小。

因此,仿真时需要针对输电线路模型,考察上述 2 种测量方法的适用范围。

4 仿真结果分析

选取不同的线路长度,针对所建立的模型进行仿真,对得到的数据文件采用不考虑线路末端电流和考虑线路末端电流 2 种不同算法,计算所得正序参数,将测量计算值与理论值进行比较,得到其相对误差,取不同线路长度时正序阻抗计算结果见表 1。

由表 1 的结果可知,线路长度较短(小于 100 km)时,由于分布电容的影响较小,不管是否考虑线路末端的电流,正序阻抗的误差都较小,满足工程要求;而随着线路长度不断增加,未考虑线路末端电流时的正序电阻和电感的测量误差也随之增大,且超过 1%,

表 1 正序阻抗仿真结果

Tab.1 Simulative results of positive impedance

线路长度 /km	不考虑线路末端电流		考虑线路末端电流	
	正序电阻 误差 /%	正序电感 误差 /%	正序电阻 误差 /%	正序电感 误差 /%
50	0.203	0.102	0.0052	0.1760
100	0.858	0.169	0.0375	0.1300
150	1.722	0.573	0.0807	0.1020
200	3.155	1.038	0.0827	0.1640
250	5.141	1.915	0.0126	0.0017
300	7.523	2.765	0.0330	0.0016
350	10.463	3.722	0.0372	0.0346
400	14.031	4.916	0.0389	0.0245
450	18.318	6.324	0.0341	0.0167
500	23.400	7.855	0.0257	0.0145

不满足工程要求;考虑线路末端电流时测量误差则比较小,低于 1%,满足工程要求。因此,对于线路长度超过 100 km 的输电线路,计算其正序参数时要考虑线路末端电流的影响;而对于线路长度小于 100 km 的输电线路,可对其进一步仿真,结果如表 2 所示。

表 2 线路长度小于 120 km 的仿真结果

Tab.2 Simulative results of transmission lines within 120 km

线路长度 /km	不考虑线路末端电流		考虑线路末端电流	
	正序电阻 误差 /%	正序电感 误差 /%	正序电阻 误差 /%	正序电感 误差 /%
20	0.079	0.443	0.0476	0.455
30	0.048	0.133	0.1190	0.159
40	0.156	0.132	0.0297	0.179
50	0.203	0.102	0.0052	0.176
60	0.177	0.055	0.1080	0.163
70	0.395	0.021	0.0064	0.167
80	0.488	0.088	0.0192	0.182
90	0.545	0.114	0.0974	0.128
100	0.757	0.169	0.0038	0.130
110	0.928	0.234	0.0347	0.128
120	1.063	0.317	0.0848	0.115

由表 2 的数据可见,线路长度小于 100 km 时,正序参数的计算相对误差小于 1%,满足工程要求,而是否考虑线路末端电流对结果的影响不大。故此时可以不考虑末端电流,采用简化的测量计算方法。

5 结论

本文利用 PSCAD 软件仿真平台,对高压架空输电线路工频正序参数的测量进行了仿真,对于传统的仅采集线路首端电压和电流的测量方法及同时采集线路首端的电压、电流和线路末端电流的测量方法,分别建模仿真,计算出正序参数,通过对计算结果进行比较分析,得出以下结论:

- 输电线路长度大于 100 km 时,应该采用同时采集线路末端电流的方法,这样所得结果比较精确;
- 输电线路长度小于 100 km 时,可以仅采集首

端电压和电流,此时计算所得结果能够满足工程要求。

在实际测量时,如果考虑线路末端电流,测量成本将更高,测量过程将更加复杂,因此,对于线路长度较短的输电线路而言,在满足工程要求的前提下,计算正序参数时可不考虑线路末端电流。

参考文献:

- 梁志瑞,杨子强,李鹏,等. 电网输电线路工频参数测量系统的研究[J]. 电网技术,2001,25(3):34-37.
LIANG Zhirui, YANG Ziqiang, LI Peng, et al. Study on measuring system for power frequency parameters of power transmission line[J]. Power System Technology, 2001, 25(3):34-37.
- 彭耀. 漫昆 500 kV 一回线路工频参数测量[J]. 云南电力技术,1997,25(1):37-46.
PENG Yao. Study on power frequency parameters of Mankun 500 kV transmission line I[J]. Yunnan Electric Power, 1997, 25(1):37-46.
- 薛志英. 输电线路工频参数在线测量方法的研究[D]. 北京:华北电力大学电气工程学院,2004.
XUE Zhiying. Study on power frequency parameter online measurement of transmission line[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2004.
- 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.
CHEN Yunping, WANG Xurui, HAN Baoliang. The principles and computer-based realization of zero-sequence parameter measurement of transmission line with mutual inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(2):38-42.
- 胡志坚,刘美观,张承学,等. 互感线路参数带电测量的研究与实现[J]. 电力系统自动化,1999,23(24):32-35.
HU Zhijian, LIU Meiguan, ZHANG Chengxue, 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.
- 刘建军. 换相法测量线路零序参数的原理[J]. 电力建设,1993,14(6):22-28.
LIU Jianjun. Principles to zero-sequence parameter measurement of transmission lines by phase interchange method[J]. Electric Power Construction, 1993, 14(6):22-28.
- 罗宁. 输电线路零序互感参数带电测量[J]. 宁夏电力,2001,1(2):5-11.
LUO Ning. Hotline measuring of zero-sequence parameter in transmission line[J]. Ningxia Power, 2001, 1(2):5-11.
- 冯光亮,侯俊,李建明,等. 输电线路工频参数测量中干扰的仿真研究[J]. 高电压技术,2005,31(6):9-11.
FENG Guangliang, HOU Jun, LI Jianming, et al. Study of the disturbance simulation for parameters measurement on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(6):9-11.
- 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):218-220,226.
LU Ming, NING Yuhong, MA Fuyi, et al. Measuring and analyzing of the power-frequency parameter for power transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3):218-220, 226.
- 魏旭,李长益. 500 kV 同杆架设线路感应电流的计算[J]. 华东电力,2000,28(3):7-10.
WEI Xu, LI Changyi. Computation of induction current in 500 kV double circuit[J]. East China Electric Power, 2000, 28(3):7-10.

- [11] 刘娟,李长益. 输电线路工频参数测量的感应电压影响及消除[J]. 电力建设,2003,24(8):33-34,40.
LIU Juan,LI Changyi. Impact of inductive voltage and its elimination during working frequency parameter measurement for transmission lines[J]. Electric Power Construction,2003,24(8):33-34,40.
- [12] 于涛,陈文文. 输电线路工频量参数测试方法综述[J]. 机电工程技术,2009,38(2):74-77.
YU Tao,CHEN Wenwen. A survey on fundamental frequency parameters measurement of power transmission lines[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2009,38(2):74-77.
- [13] JIANG J A,YANG Junzhe,LIN Yinghong,et al. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2000,15(2):488-491.
- [14] 陈慈萱. 电气工程基础(上册)[M]. 北京:中国电力出版社,2003:57-58.
- [15] 何仰赞,温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 3版. 武汉:华中科技大学出版社,2002:20-26.
- [16] 邓春,袁亦超,王征,等. 长距离输电线路工频参数测量中的数

据处理[J]. 华北电力技术,2004(2):48-50.

DENG Chun,YUAN Yichao,WANG Zheng,et al. Data treating in measuring power frequency parameters at long distance transmission line[J]. North China Electric Power,2004(2):48-50.

(编辑:柏英武)

作者简介:

白日昶(1952-),男,回族,江西南昌人,副总工程师,研究方向为通信技术在电力系统中的应用、电力系统及其自动化(E-mail:brc@sina.com);

帅玲玲(1983-),女,江西奉新人,助理工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

张承学(1955-),男,湖北武汉人,教授,研究方向为电力系统及其自动化;

李海涛(1986-),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化;

孙元博(1982-),男,内蒙古包头人,博士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。

Simulation of power-frequency positive-sequence parameter measurement for high-voltage overhead transmission line

BAI Richang¹,SHUAI Lingling¹,ZHANG Chengxue²,LI Haitao²,SUN Yuanbo²

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

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

Abstract: Different power-frequency positive-sequence parameter measurements for transmission lines are compared. The equivalent circuit of transmission line is analyzed theoretically according to its different lengths, its parameters are calculated based on the digital parameter measurement, and the frequency-related phase model is selected as the transmission line model. The simulation model is constructed based on PSCAD software platform and the simulative results for different power-frequency positive-sequence parameter measurements are compared. The positive-sequence impedance is calculated for two conditions: with and without the line-end current. The difference between calculated and theoretical values is analyzed and the conclusion is that: when the length of transmission line is shorter than 100 km, the value calculated only with the line-head voltage and current may meet the practical requirements; when the length is longer than 100 km, the line-end current should be acquired to get more accurate result.

This work is supported by the Science and Technology Project of Jiangxi Electric Power Corporation(2009050901).

Key words: overhead transmission line; power-frequency parameter measurement; PSCAD; phase model; error analysis