

利用电压及电流双端测量信息的高压输电线路正序参数测量方法及应用

李炜¹, 汤吉鸿¹, 于雅玲¹, 胡志坚², 李洪江², 肖欢², 程小敏²

(1. 湖南省电力公司调度通信局, 湖南省长沙市 410007;
2. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

An Approach to Measure Positive-Sequence Parameters of HV Transmission Line by Using Two-Terminal Measured Voltage and Current Data and Its Application

LI Wei¹, TANG Jihong¹, YU Yaling¹, HU Zhijian², LI Hongjiang², XIAO Huan², CHENG Xiaomin²

(1. Hunan Electric Power Dispatch & Communication Bureau, Changsha 410007, Hunan Province, China;
2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Based on the simultaneously measured data of three-phase voltages and currents at both ends of transmission line by global positioning system (GPS), an approach to measure positive-sequence parameters of HV transmission line, in which the simultaneously measured two-terminal information of voltages and currents of transmission line is used, is proposed. The procedures of measuring positive-sequence parameters as well as calculation formulae for positive-sequence impedance and capacitance, in which the influence of distributed capacitance is taken into account, are given, and the hardware structure of the measuring system is described. Results of simulation and actual measurements show that the proposed approach is feasible.

KEY WORDS: HV transmission lines; two-terminal measured data; positive sequence parameter; global positioning system (GPS)

摘要: 利用全球卫星定位系统同时测量输电线路首末两端的三相电压和三相电流, 提出了利用输电线路的双端电压及电流测量信息的高压输电线路正序参数测量方法。给出了正序参数测量步骤及计及分布电容影响的正序阻抗和正序电容计算公式, 并给出了测量系统的硬件结构。仿真与实测结果验证了该方法的可行性。

关键词: 高压输电线路; 双端测量信息; 正序参数; 全球卫星定位系统

0 引言

输电线路是电力输送的载体, 是电力系统的主要组成部分之一。输电线路的工频参数主要包括正序阻抗、正序导纳、零序阻抗、零序导纳以及多回

互感线路之间的互感等^[1-2], 以上参数用于电力系统的潮流计算、短路电流计算、继电保护整定计算以及电力系统运行方式选择, 其准确性直接关系到计算结果的准确性。随着我国电力系统的不断发展, 电网不断扩大, 电力系统自动化程度不断提高, 对输电线路参数的准确性要求也越来越高, 因而准确获取输电线路参数对电力系统安全运行具有重要意义。

线路参数的计算较为复杂, 同时受很多不确定因素的影响, 包括线路几何形状、线路电流、环境温度、风速、土壤电阻率、避雷线架设方式和线路路径等^[1]。此外, 长距离输电线路的下垂、带电线路的集肤效应和发热、地质情况的随机性质等也会给线路参数计算带来困难。输电线路参数通常在线路建成初期进行测定^[2], 该类参数在投运后由于气候、温度、环境及地理等因素的影响会或多或少发生变化。因此, 仅仅依靠理论计算无法获取线路参数的准确值, 线路参数需要定期测量。

目前输电线路参数测量方法研究已取得众多成果^[3-10], 相应测量装置已研制成功, 并已投入运行。然而对于高压输电线路, 其电压等级高、输电距离长, 传统测量方法测量高压输电线路参数时, 忽略了输电线路的分布电容, 且采用输电线路集中参数模型, 其测量误差较大^[11]。因此高压输电线路参数的测量必须考虑线路分布电容的影响^[12-14]。文献[15]提出了利用电压及电流的单端测量信息的高压输电线路 π 模型测量方法, 与传统测量方法相比, 测量精度得到了提高, 但 π 模型在本质上仍属

于集中参数模型，该方法的测量精度会随输电线路长度的增加而降低。

为此，本文将利用全球卫星定位系统(global positioning system, GPS)同时测量输电线路首末两端的三相电压和三相电流，并利用该双端测量信息提出计及分布电容影响的高压输电线路正序参数(包括正序阻抗和正序电容)测量方法，该方法适合于高压、超高压和特高压输电线路的正序参数的测量。

1 测量步骤及计算方法

1.1 测量步骤

高压输电线路正序参数测量方法包括以下步骤：

1) 将待测的输电线路停电后加压，以便得到供测量计算用的正序电压和正序电流。

测量输电线路的正序阻抗时，将待测量输电线路停电，短接输电线路末端三相，在输电线路首端加上三相电压，测量接线示意图如图 1 所示，图 1 中 CT(current transformer)为电流互感器，PT (potential transformer)为电压互感器。

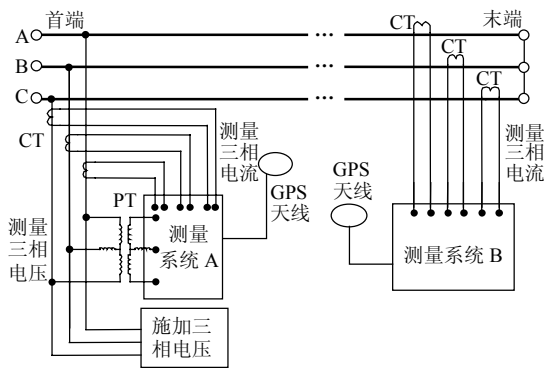


图 1 输电线路正序阻抗测量接线

Fig. 1 Wiring for measuring the positive sequence impedance of transmission line

测量输电线路正序电容时，将待测量输电线路停电，并将输电线路末端三相开路，在输电线路首端加上三相电压，测量接线示意图如图 2 所示。

2) 利用 GPS 技术同时测量输电线路首末两端的三相电压和三相电流，实现对该输电线路首末两端三相电压和三相电流的同步采样。

测量系统 A、B 利用 GPS 授时功能获得误差小于 1 μs 的时间基准，时间同步后在输电线路首端加上三相电压，同步采集装置同时采集加压后输电线路首末端的三相电压和三相电流，并以文件方式将测量数据存入测量系统硬盘中。

3) 将输电线路首末端测量数据汇总到同一台

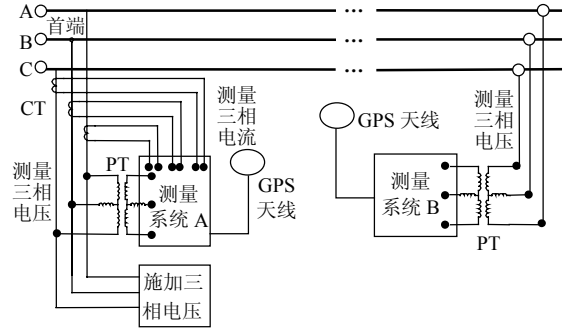


图 2 输电线路正序电容测量接线

Fig. 2 Wiring for measuring the positive sequence capacitance of transmission line

计算机中。

1.2 计算方法

计算机在获得输电线路的三相电压和三相电流测量数据后，先采用傅里叶算法求得输电线路首末两端的三相基波电压和三相基波电流；再对首末两端的三相基波电压进行序分解，得到首末两端基波电压的正、负、零序分量；然后对首末两端的三相基波电流进行序分解，得到首末两端基波电流的正、负、零序分量；最后分别计算该输电线路的正序阻抗和正序导纳。

输电线路正序阻抗计算公式为

$$z_1 = r_1 + jx_1 = \frac{\dot{U}_{p1}}{\frac{(\dot{I}_{p1} + \dot{I}_{q1})}{2} K_1} \quad (1)$$

式中： r_1 为输电线路的正序电阻， Ω ； x_1 为输电线路的正序电抗， Ω ； \dot{U}_{p1} 为输电线路首端的基波正序电压，V； \dot{I}_{p1} 和 \dot{I}_{q1} 为输电线路首末两端的基波正序电流，A； K_1 为计及分布电容影响且与输电线路长度 L 有关的修正系数， $K_1=1+k_1L/50$ ， k_1 的取值如表 1 所示。

表 1 k_1 取值

Tab. 1 Value of k_1

L/km	k_1
≤ 100	0.000
$100 < L \leq 500$	0.003
$500 < L \leq 700$	0.004
$700 < L \leq 800$	0.005

由表 1 可知，输电线路长度小于 100 km 时，可不考虑分布电容的影响；输电线路越长，分布电容对测量结果的影响也越大， K_1 随输电线路长度的增加而增加，可减少分布电容对测量结果的影响。

输电线路正序导纳计算公式为

$$\dot{Y} = g_1 + jb_1 = \frac{\dot{I}_{p1}}{\frac{(\dot{U}_{p1} + \dot{U}_{q1})}{2} K_2} \quad (2)$$

式中： g_1 为输电线路的正序电导，S； b_1 为输电线路的正序电纳，S； \dot{U}_{q1} 为输电线路末端的基波正序电压，V； \dot{I}_{p1} 为输电线路首端的基波正序电流，A； K_2 为与输电线路长度 L 有关的修正系数， $K_2=1+k_2L/50$ ， k_2 取值如表 2 所示。

表 2 k_2 的取值
Tab. 2 Value of k_2

L/km	k_2	L/km	k_2
≤ 50	0.000 0	$400 < L \leq 450$	0.002 3
$50 < L \leq 100$	0.000 3	$450 < L \leq 500$	0.002 6
$100 < L \leq 150$	0.000 5	$500 < L \leq 550$	0.002 9
$150 < L \leq 200$	0.000 8	$550 < L \leq 600$	0.003 2
$200 < L \leq 250$	0.001 1	$600 < L \leq 650$	0.003 5
$250 < L \leq 300$	0.001 4	$650 < L \leq 700$	0.003 8
$300 < L \leq 350$	0.001 7	$700 < L \leq 750$	0.004 1
$350 < L \leq 400$	0.002 0	$750 < L \leq 800$	0.004 4

通常，输电线路正序电导 g_1 很小，可忽略不计，则正序电容 c_1 的计算公式为

$$c_1 = \frac{\text{Im}[2\dot{I}_{p1}/(\dot{U}_{p1}K_2 + \dot{U}_{q1}K_2)]}{2\pi f} \quad (3)$$

式中 f 为频率。

2 仿真分析

为检验本文测量方法的正确性，本节利用 Matlab 对高压线路参数进行仿真计算。仿真输电线路正序参数如表 3 所示，数据采样率为 80 点/周期。

表 3 输电线路正序参数

Tab. 3 Positive sequence parameters of transmission line

正序电阻/(Ω/km)	正序电抗/(Ω/km)	正序电容/(F/km)
0.050	0.314 2	12.74×10^{-9}

本文采用 3 种方法测量正序阻抗，仿真测量结果如表 4 所示，表 4 中正序阻抗理论值为正序阻抗参数与输电线路长度的乘积。仿真中采用的首末端电压和电流通过用图 1 方法利用 Matlab 中的测量模块得到。

方法 1 为传统测量方法，其正序阻抗计算公式为

$$z_1 = r_1 + jx_1 = \frac{\dot{U}_{p1}}{\dot{I}_{p1}} \quad (4)$$

方法 2 正序阻抗计算公式为

$$z_1 = r_1 + jx_1 = \frac{\dot{U}_{p1}}{(\dot{I}_{p1} + \dot{I}_{q1})/2} \quad (5)$$

方法 3 正序阻抗计算公式为式(1)。

3 种方法测得正序阻抗与正序阻抗理论值之间的误差如图 3 所示。由图 3 可知，在输电线路长度

表 4 正序阻抗仿真测量结果

Tab. 4 Simulation measurement results of positive sequence impedance

L/km	正序阻抗/ Ω			理论值
	传统方法	本文方法 1	本文方法 2	
50	2.480+j15.731	2.476+j15.718	2.489+j15.712	2.500+j15.708
100	5.257+j31.555	5.223+j31.459	5.120+j31.424	5.000+j31.416
150	7.747+j47.573	7.635+j47.244	7.567+j46.823	7.500+j47.124
200	10.459+j63.902	10.191+j63.116	10.063+j62.356	10.000+j62.832
250	13.392+j80.618	12.856+j79.061	12.666+j77.893	12.500+j78.540
300	16.343+j97.876	15.402+j95.136	15.125+j93.455	15.000+j94.248
350	19.398+j115.82	17.879+j111.38	17.511+j109.09	17.500+j109.96
400	23.091+j134.58	20.713+j127.79	20.227+j124.79	20.000+j125.66
450	27.011+j154.34	23.476+j144.41	22.859+j140.61	22.500+j141.37
500	31.203+j175.33	26.154+j161.26	25.392+j156.56	25.000+j157.08
550	36.124+j197.79	29.024+j178.39	27.803+j170.88	27.500+j172.79
600	41.939+j221.98	32.082+j195.81	30.612+j186.84	30.000+j188.50
650	48.483+j248.34	35.076+j213.56	33.342+j203.01	32.500+j204.20
700	55.982+j277.35	38.014+j231.69	35.998+j219.40	35.000+j219.91
750	65.821+j309.51	41.474+j250.26	39.127+j236.09	37.500+j235.62
800	77.521+j345.59	44.877+j269.26	42.177+j253.07	40.000+j251.33

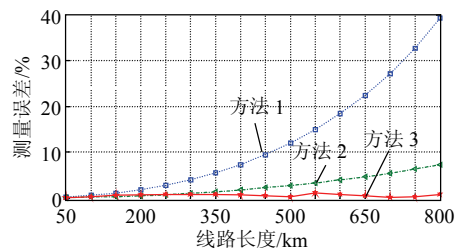


图 3 输电线路正序阻抗仿真测量误差
Fig. 3 Simulation measurement errors of positive sequence impedance

小于 300 km 时，方法 2、3 的测量精度基本相同；线路长度超过 300 km 时，方法 3 的测量精度更高；方法 3 的测量误差最小，均在 1% 以内；传统方法的测量误差随输电线路的长度增加而显著增加，输电线路长度小于 200 km 时，其测量误差已经大于 2%。

本文同样采用 3 种方法测量正序电容，仿真测量结果如表 5 所示，表 5 中正序电容理论值为正序电容参数与输电线路长度的乘积。仿真中采用的首末端电压和电流通过图 2 方法利用 Matlab 中的测量模块得到。

方法 1 为传统测量方法，正序电容计算公式为

$$c_1 = \frac{\text{Im}(\dot{I}_{lp}/\dot{U}_{lp})}{2\pi f} \quad (6)$$

方法 2 正序电容计算公式为

$$c_1 = \frac{\text{Im}[2\dot{I}_{p1}/(\dot{U}_{p1} + \dot{U}_{q1})]}{2\pi f} \quad (7)$$

方法 3 正序电容计算公式为式(3)。

表 5 正序电容仿真测量结果
Tab. 5 Simulation measurement results of positive sequence capacitance

L/km	正序电容/ μF			理论值
	传统方法	本文方法 1	本文方法 2	
50	0.637 74	0.637 24	0.637 10	0.637 00
100	1.279 60	1.275 60	1.274 80	1.274 00
150	1.929 50	1.915 80	1.912 90	1.911 00
200	2.591 60	2.558 80	2.550 60	2.548 00
250	3.271 30	3.206 20	3.188 70	3.185 00
300	3.973 00	3.858 50	3.826 40	3.822 00
350	4.702 90	4.517 40	4.464 30	4.459 00
400	5.467 10	5.183 50	5.101 90	5.096 00
450	6.273 20	5.858 00	5.739 20	5.733 00
500	7.130 40	6.542 30	6.376 50	6.370 00
550	8.049 90	7.238 10	7.014 30	7.007 00
600	9.043 10	7.945 90	7.652 10	7.644 00
650	10.126 00	8.667 20	8.290 10	8.281 00
700	11.322 00	9.405 10	8.918 20	8.918 00
750	12.651 00	10.159 00	9.543 70	9.555 00
800	14.149 00	10.932 00	10.213 00	10.192 00

3 种方法测得正序电容与正序电容理论值之间的误差如图 4 所示。由图 4 可得与正序阻抗测量误差相似的结论。

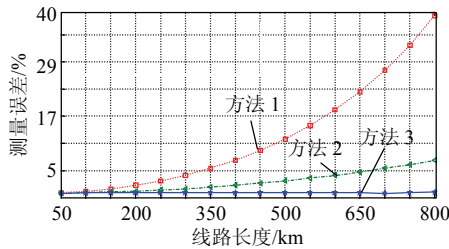


图 4 输电线路正序电容仿真测量误差
Fig. 4 Measurement error curves of positive sequence capacitance

由图 3、4 可知，方法 3 的测量精度最高，可适于高压长距离输电线路正序参数的测量。

3 测量系统硬件组成

测量系统硬件组成如图 5 所示。测量系统采用了嵌入式系统设计方法，由 GPS 接收机、信号变送器、嵌入式数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、同步数据采集卡、双口随机存取存储器(random access memory, RAM)、嵌入式 PC 卡、液晶显示器和硬盘等构成。

电压及电流信号分别经信号变送器送入嵌入式 DSP 同步数据采集卡，GPS 接收机输出的秒脉冲信号送入嵌入式 DSP 同步数据采集卡的 DSP 中断口，GPS 接收机输出的时间信息输入到嵌入式 PC 卡的串行口中，DSP 卡采集数据经双口 RAM 由嵌入式 PC 卡读取并存入硬盘，供正序参数测量计算

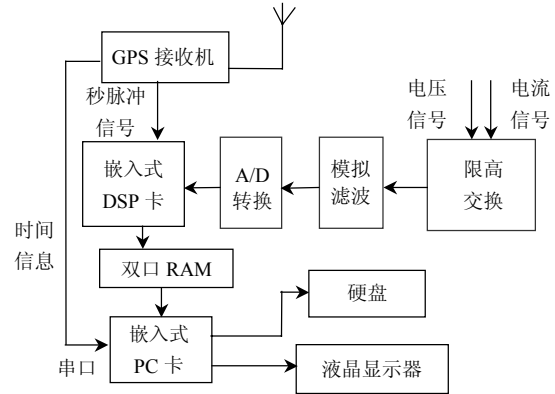


图 5 测量系统硬件组成

Fig. 5 Hardware structure of the measurement system
软件使用。

4 测量实例

本文以国内某 2 条 500 kV 输电线路(如图 6 所示)为例验证本文方法的有效性，2 条线路长度已在图 6 中标注。3 种方法的正序阻抗测量结果如表 6 所示。

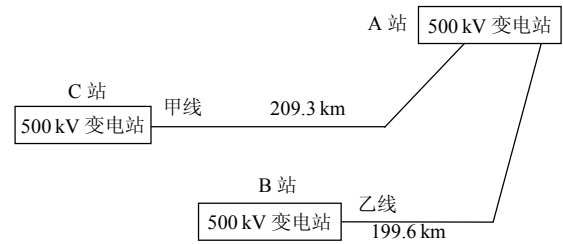


图 6 500 kV 输电线路

Fig. 6 500 kV transmission lines

表 6 正序阻抗测量结果

Tab. 6 Measurement results of positive sequence impedance

线路	正序阻抗/ Ω		
	方法 1	方法 2	方法 3
甲线	6.293+j59.877	6.236+j59.319	6.198+j59.078
乙线	5.946+j56.923	5.898+j56.386	5.881+j56.216

由图 3、4 可知，方法 3 的测量精度最高，因此本节以方法 3 测量结果为基准求取正序阻抗测量结果的相对误差，如表 7 所示，其中相对误差= $|\text{方法 1(2)测量结果}-\text{方法 3 测量结果}|/\text{方法 3 测量结果} \times 100\%$ 。

由表 7 可知，输电线路长度达到 200 km 时，传统测量方法的相对误差较大，这是因为传统测量

表 7 正序阻抗测量误差

Tab. 7 Measurement errors of positive sequence impedance

线路	正序阻抗测量误差/%	
	方法 1	方法 2
甲线	1.35	0.38
乙线	1.32	0.36

方法忽略了输电线路的分布电容的影响,因而其测量误差将随输电线路电压等级的升高以及输电距离的增加而增加。

5 结论

由于分布电容的影响,传统方法测量高压长距离输电线路的正序参数时,其测量精度将难以满足要求。本文测量方法计及了分布电容的影响,并已应用于500kV输电线路正序参数测量,实测结果证明了本文方法完全可以满足高压输电线路正序参数测量的需要。

测量输电线路正序参数时,线路之间的互感使带电运行线路对待测量线路造成了干扰,该干扰通常为工频性质,为消除工频干扰的影响,可采用异频法进行高压输电线路正序参数的测量。本文提出的输电线路测量方法也可适用于异频法进行高压输电线路正序参数的测量,但需要继续深入研究修正系数与频率之间的对应关系,该内容为下一步研究工作的重点。

参考文献

- [1] 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: 204-223.
- [2] 李建国, 朱康. 高压电气设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 258-265.
- [3] 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 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(in Chinese).
- [4] 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 Zhijian, Chen Yunping, 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(in Chinese).
- [5] Hu Zhijian, Chen Yunping. New method of live line measuring the inductance parameters of transmission lines based on GPS technology [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(3): 1288-1295.
- [6] 胡宁, 胡志坚, 郑罡, 基于全球定位系统与积分方程的互感线路零序参数带电测量[J]. 电网技术, 2005, 29(8): 76-80.
Hu Ning, Hu Zhijian, Zheng Gang. Live line parameter measurement of transmission lines with mutual inductance based on GPS technology and integral equations[J]. Power System Technology, 2005, 29(8): 76-80(in Chinese).
- [7] 毛鹏, 张承学, 王元媛, 等. 线路零序参数带电测量电容分量补偿算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 55-58,82.
Mao Peng, Zhang Chengxue, Wang Yuanyuan, et al. A capacitive current compensation algorithm on zero-sequence parameters live line measurement of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 55-58, 82 (in Chinese).
- [8] 李澍森, 陈晓燕, 戚革庆, 等. 同塔四回输电线路参数带电测量[J]. 高压技术, 2006, 32(7): 17-20.
Li Shusen, Chen Xiaoyan, Qi Geqing, et al. Discussion on live line measurement of the parameters of the transmission lines with four-circuit on a tower[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 17-20(in Chinese).
- [9] 胡志坚, 陈允平, 张承学. 基于GPS的互感线路零序参数带电测量方法[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 4-7,18.
Hu Zhijian, Chen Yunping, Zhang Chengxue. A new method of parameters live line measurement of transmission lines based on GPS technology[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 4-7,18(in Chinese).
- [10] 方丽华, 胡志坚. 含T接线互感线路参数带电测量方法及工程应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 204-208.
Fang Lihua, Hu Zhijian. A new method for live line measurement of zero-sequence parameters of transmission line containing T-connection transmission line with mutual inductance and its engineering application[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 204-208(in Chinese).
- [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 Fuyu, et al. Measuring and analysing of the power-frequency parameter for power transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 218-220,226(in Chinese).
- [12] 薛士敏, 贺家李, 李永丽. 特高压输电线路分布电容对负序方向纵联保护的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 94-97.
Xue Shimin, He Jiali, Li Yongli. Influence of distributed capacitance on negative sequence directional pilot protection for UHV transmission lines[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 94-97(in Chinese).
- [13] 董新洲, 苏斌, 薄志谦, 等. 特高压输电线路继电保护特殊问题的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 19-22.
Dong Xinzhou, Su Bin, Bo Zhiqian, et al. Study of special problems on protective relaying of UHV transmission line[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2004, 28(22): 19-22(in Chinese).
- [14] 黄少锋, 王兴国. 特高压线路固有频率特征分析及其在继电保护中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 95-102.
Huang Shaofeng, Wang Xingguo. Natural frequency characteristic analysis of UHV transmission line and its application in protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 95-102(in Chinese).
- [15] 刘遵义, 卢明, 吕中宾, 等. 特高压交流输电线路工频参数测量技术及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(10): 59-62.
Liu Zunyi, Lu Ming, Lü Zhongbin, et al. Power frequency parameter measurement technology for UHV transmission lines and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(10): 59-62(in Chinese).

收稿日期: 2010-07-08。

作者简介:

李炜(1975), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护方面的研究, E-mail: lywey@sina.com;

胡志坚(1969), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统稳定分析控制与电网自动化方面的研究。



李炜

(编辑 徐梅)