

线路零序参数带电测量电容分量补偿算法

毛 鹏¹, 张承学², 王元媛², 白日昶¹, 胡志坚², 帅玲玲¹

(1. 江西省电力公司超高压分公司, 江西省南昌市 330029; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

摘要: 鉴于输电线路参数的重要性和影响线路参数因素的复杂性, 输电线路参数值均要求实际测量, 尤其是零序参数。通过对输电线路分布特性的分析, 获得了输电线路参数测量集中参数模型; 基于增量法测量零序参数, 提出一种通过输电线路电容电流分量来校正参数测量计算的改进算法, 并推导出具体的补偿依据, 在参数计算中引入了电流补偿度因子 η 及其表达式, 理论分析可知该补偿算法可提高测量参数的精度。最后利用 PSCAD 对高压互感输电线路的零序参数测量进行了仿真计算和对比分析, 验证了加入补偿算法和选取的补偿度对提高测量计算参数精度的有效性。

关键词: 输电线路; 零序参数; 带电测量; 电容电流补偿; PSCAD

0 引言

输电线路参数属于电力系统的基础参数, 对于电力系统计算、分析和继电保护整定等具有非常重要的作用。鉴于线路现场施工以及地理环境的多变性和复杂性, 通过设计参数精确计算输电线路参数几乎不可能, 因此, 国内规程要求高压输电线路的正、零序阻抗和电容必须实测^[1]。

随着电网建设的快速发展, 由于输电线路走廊的限制以及环保因素的综合考虑, 存在电磁耦合的输电线路逐步增多, 尤其是同杆并架双回线、多回线路, 以及部分同杆并架线路日益增多, 使得线路之间的零序自感和互感参数测量变得更加复杂。停电测量方法需要所有存在互感影响的输电线路均处在停电状态才能实现, 这对电网运行方式的调整和电网的安全稳定运行带来不利影响, 导致此参数只能在新建线路上测量; 另外, 由于气候和地理环境的变化, 以及部分线路改造的影响, 从运行角度来看, 此参数尚需定期测量, 以进行参数的对照分析。近年来采用的输电线路参数带电测量方法, 是在互感线路分别对一条线路短时停电并加入激励, 而其他线路正常运行时测量并组合求解零序参数^[2]。在线路较短(100 km 以内)时采用线路首末端零序电压和电流直接参与计算。但随着线路长度以及电压等级的增大, 忽略线路电容电流的影响会对测量计算结果带来偏差。

本文基于输电线路参数带电测量, 在增量法测量零序参数的基础上, 将输电线路电容电流的影响引入计算模型, 以达到精确测量的目的。

1 输电线路的模型转换

设长度为 l 的输电线路, 其单位长度的电阻、电感、电容、电导分别为 R_0, L_0, C_0, G_0 , 且这些参数沿线均匀分布, 则对微元段 dx 的等效电路见图 1^[3]。

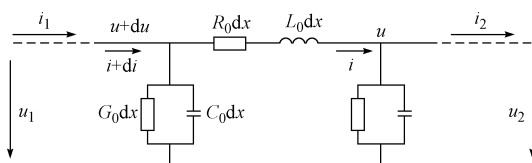


图 1 输电线路的微元等效电路

Fig. 1 Infinitesimal element equivalent circuit of transmission line

根据基尔霍夫定律可得如下微分方程组:

$$\begin{cases} u + du = iR_0 dx + L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + u \\ i + di = G_0 dx(u + du) + C_0 dx \left(\frac{\partial}{\partial t}(u + du) \right) + i \end{cases} \quad (1)$$

对于电压、电流均为正弦波的稳态情况, 忽略高阶微分项求解方程, 得到长度为 l 的线路首末端电流及电压的关系式为:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cosh \gamma l + Z_c \dot{I}_2 \sinh \gamma l \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cosh \gamma l + \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \sinh \gamma l \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z_c = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)}$ 为线路波阻抗; $\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$ 为线路传播系数。

设式(2)对应的二端口网络传输方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

则矩阵 $\mathbf{T}$ 可看做是如图 2 所示的 π 形等值电路的 $\mathbf{T}$ 参数矩阵^[4]。

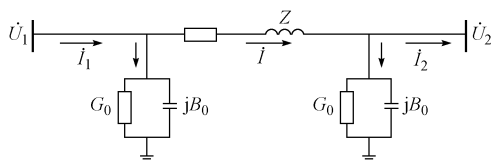


图2 输电线路π形等值电路

Fig. 2 π-type equivalent circuit of transmission line

计算可得:

$$Z = b = Z_c \sinh \gamma l \quad (3)$$

$$G_0 + jB_0 = \frac{a-1}{b} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_c \sinh \gamma l} \quad (4)$$

通常情况下,利用输电线路两端的电气量计算参数时,忽略了线路的波过程和电容电流,即认为线路的集中阻抗为单位长度的阻抗值与线路长度的乘积,且用“一字形等值电路”^[3]代替π形等值电路对参数进行求解。以零序自阻抗测量为例,假设线路末端接地,有 $\dot{U}_2=0$,设不考虑电容电流时所求阻抗为 Z_1 ,则其相对于基准阻抗 Z 的误差 $|\Delta Z|$ 为:

$$|\Delta Z| = \frac{|Z_1| - |Z|}{|Z|} = \left| \frac{1}{Z} \left(\frac{1}{G_0 + jB_0} // Z \right) \right| - 1$$

将式(3)、式(4)代入上式得:

$$|\Delta Z| = \left| \frac{1}{\cosh \lambda l} \right| - 1 \quad (5)$$

以 500 kV 输电线路为例,设其单位长度零序自阻抗为 $Z_0 = (0.16 + j1.22) \Omega/\text{km}$,零序容纳(电导忽略)为 $B_0 = (1.69 \times 10^{-6}) \text{S}/\text{km}$,若允许误差为 1%,解得线路长度 $l \approx 100 \text{ km}$ 。线路长度超出 100 km 时,零序自阻抗测量计算误差随着线路长度的增加呈抛物线递增趋势(见式(5)),所以对于超高压远距离输电线路,忽略电容电流必然会对测量结果造成较大偏差。

2 多回互感线路零序参数带电测量方法

互感线路零序互感参数的传统测量方法,是将与待测线路存在互感耦合的线路停电后进行测量^[5]。电力系统往往难以满足这种要求,于是提出了带电参数测量,其基本方法是:人为制造足够大的零序电流激励,这样所有存在互感的线路上就会产生零序电流及零序电压的增量,这些增量可由每条线路的首末端电压和电流计算得到,通过这些量来列解方程最终得到零序参数值^[6-9]。

2.1 增量法测量零序参数的原理

假设有 n 条互感线路,若在线路 i 中人为注入零序电流 $\Delta \dot{I}_i$,则在互感线路 j 中会产生零序增量电流 $\Delta \dot{I}_j$,互感线路零序阻抗矩阵可记为如下形式:

$$\dot{U} = \dot{U}_0 + \Delta \dot{U} = \mathbf{Z} \dot{I}_0 + \mathbf{Z} \Delta \dot{I} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Z}$ 为阻抗矩阵,元素 $Z_{ii} = R_{ii} + jX_{ii}$,为线路 i 的自阻抗($i=1,2,\dots,n$),元素 $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$,为线路 i 与 j 之间的互阻抗($i,j=1,2,\dots,n; i \neq j$); $\dot{U}_0 = [\dot{U}_{01}, \dot{U}_{02}, \dots, \dot{U}_{0i}, \dots, \dot{U}_{0n}]^T$ 和 $\dot{I}_0 = [\dot{I}_{01}, \dot{I}_{02}, \dots, \dot{I}_{0i}, \dots, \dot{I}_{0n}]^T$ 分别为 $\Delta \dot{I}_i$ 注入前的零序电压和零序电流; $\Delta \dot{U} = [\Delta \dot{U}_1, \Delta \dot{U}_2, \dots, \Delta \dot{U}_n]^T$ 和 $\Delta \dot{I} = [\Delta \dot{I}_1, \Delta \dot{I}_2, \dots, \Delta \dot{I}_n]^T$ 分别为 $\Delta \dot{I}_i$ 注入后互感线路的零序电压和零序电流增量。

式(6)的增量形式为:

$$\Delta \dot{U} = \mathbf{Z} \Delta \dot{I} \quad (7)$$

由上述分析可知,通过测量每回运行的输电线路首末端在生成 $\Delta \dot{I}_i$ 后的零序电压、零序电流可得到式(7)的方程组。互感线路零序参数矩阵为对称矩阵, n 回线路共有 $n(n+1)/2$ 个待求未知数,但每一次测量仅可得到 n 个方程,无法求出零序参数,需要进行多次测量,使方程数不小于待求参数个数。设共进行了 p ($p \geq n$) 次测量,则计算方程为:

$$\Delta \dot{U} = \mathbf{A} \mathbf{Z} \quad (8)$$

第 k 次测量任一条线路 i 上的零序压降应满足关系式:

$$\Delta \dot{U}_i^{(k)} = Z_{i1} \Delta \dot{I}_1^{(k)} + Z_{i2} \Delta \dot{I}_2^{(k)} + \dots + Z_{in} \Delta \dot{I}_n^{(k)} + \dots + Z_{im} \Delta \dot{I}_m^{(k)} \quad (9)$$

系数矩阵 $\mathbf{A}$ 为 $pn \times n(n+1)/2$ 阶零序电流测量矩阵。对于方程个数大于未知数的超定方程,可以利用最小二乘估计,方程(8)的解为:

$$\mathbf{Z} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \dot{U} \quad (10)$$

2.2 加入电流修正的零序参数测量计算

按式(7)或式(8)利用线路首末端的零序电流和电压求解的零序参数忽略了π形等值网络中的并联电阻和电容参数,实际上并联电阻可以取为无穷大,这里仅考虑电容的影响。式(7)中线路的电流为单端电流信号,测量方法默认首末端电流相等,则参与计算的电流值即为测量到的首端值。当输电线路较长(一般大于 100 km)时,电容电流的影响也会相应增大,需要对参与计算的线路零序电流进行修正。如果测量线路的首端电流为 $\dot{I}_1$,则线路上流过的零序阻抗电流可表示为:

$$\dot{i} = \dot{I}_1 - \dot{I}_Y = \dot{U} B' \quad (11)$$

式中: $\dot{I}_Y$ 为线路π形等值网络中并联电阻和电容上的总电流分量,不考虑电导,设 $\dot{I}_Y$ 为电容电流; B' 为参与电流补偿的计算电纳; $\dot{U}$ 为计算电压。

测量时,加压线路的末端接地,可以仅利用π形

等值电路的首端电压计算电容电流。对正常运行的线路,由于末端零序电压不为 0,因此在求电容电流时,可利用 T 形等值电路的思想,将导纳参数集中在线路的中间,并假设线路电压均匀分布,式中的电压取为 $\dot{U}=(\dot{U}_1+\dot{U}_2)/2$ 。对于电纳 B' 的选取,则应综合考虑线路长度及分布参数的影响,以各回线路对地自电纳为基准,寻找合适的补偿度 η 。将每回线路的测量电流通过以上方法修正后代入方程(8)进行求解,得到考虑了电容电流的零序参数阻抗。

3 零序参数带电测量的 PSCAD 仿真分析

在 PSCAD 中建立同杆并架 500 kV 双回输电线路如图 3 所示。利用对一条线路停电加压的方式获得零序电流增量。线路 L1 正常运行,首端接 500 kV 三相交流电源,末端接负荷;线路 L2 首端三相短路施加 1 kV 单相电源,末端三相短路接地。

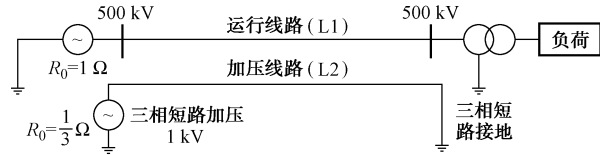


图 3 500 kV 双回互感线路仿真模型

Fig. 3 Simulation model of 500 kV double circuit transmission lines with mutual inductance

利用物理参数对输电线路进行描述,且两回线路的物理参数相同。输电线路模型采用贝杰龙模型(Bergeron model),由相应计算模块自动生成零序参数,其单位长度的零序自阻抗 Z_s 、零序互阻抗 Z_m 、零序自容纳 B_s 分别为:

$$Z_s=(0.162\ 370\ 446+j1.217\ 876\ 53)\Omega/\text{km}$$

$$Z_m=(0.137\ 796\ 440+j0.696\ 550\ 917)\Omega/\text{km}$$

$$B_s=(1.688\ 219\ 85\times 10^{-6})\text{S}/\text{km}$$

该模型综合考虑了输电线路分布参数的影响,并输出了等效 π 形等值电路相对应的长线修正集中参数,其 Z_{cs} 、 Z_{cm} 、 B_{cs} 如表 1 所示。

表 1 不同线路长度时的长线修正参数
Table 1 Long line corrected parameters with different line lengths

l/km	Z_{cs}/Ω	Z_{cm}/Ω	B_{cs}/S
50	$8.099\ 9+j60.845\ 1$	$6.872\ 9+j34.791\ 2$	$8.443\ 7\times 10^{-5}$
100	$16.088\ 0+j121.397\ 9$	$13.644\ 5+j69.364\ 4$	$1.690\ 3\times 10^{-4}$
150	$23.853\ 6+j181.367\ 7$	$20.214\ 4+j103.502\ 8$	$2.539\ 5\times 10^{-4}$

从表 1 可见,线路的零序集中阻抗并非简单的单位长度阻抗与线路长度的乘积(长线近似值),随着线路长度的增加,近似值的误差越大,必须考虑参数分布特性影响;而零序自容纳的长线近似值与修

正值非常接近,误差可以忽略。

对于双回输电线路互感参数的带电测量,至少需要在不同运行方式下进行 2 次。设双回线路的所有参数均一致,则第 2 次的测量过程可以忽略,其结果仅在第 1 次测量的基础上,将两回线路互换即可。图 3 中需要测量的电量包括两回线路的首端零序电压、零序电流及正常运行线路的末端零序电压共 5 个量,利用 PSCAD 输出的采样值通过相应算法获得各电量幅值和相角,列写如式(8)所示的超定方程,计算求解零序参数。

取 PSCAD 内部计算模块输出的线路零序自电纳 B (表 1 中的 B_{cs}),并以其为标准,引入补偿度 η ,则补偿电纳 B' 为:

$$B'=B\eta \quad (12)$$

根据表达式 $Z_{cs}=R_{cs}+jX_{cs}$,取补偿度 η 为:

$$\eta=\frac{X_{cs}}{R_{cs}+X_{cs}} \quad (13)$$

依据式(11)给出的电流补偿公式,分别取 $\eta=1$ 的全补偿、 $\eta=2/3$ 的固定补偿和以式(13)给出的 η 表达式,按式(12)对式(8)中的计算电流进行校正。

通过 2.1 节的常规模型算法与 2.2 节的电容电流补偿模型算法对零序互感参数的计算结果进行对比。以 PSCAD 输出的长线修正阻抗为基准的仿真计算结果及误差如表 2 所示,误差表示为:

$$\frac{\text{计算值}-\text{长线修正值}}{\text{长线修正值}}\times 100\%$$

对应 3 种线路长度以及不同补偿度 η 下仿真计算结果的相对误差分布曲线如图 4 所示。

仿真与计算结果表明:

1)取补偿度 $\eta=0$,即忽略电容电流的影响,只利用线路的首端零序电流和首末端零序电压进行零序参数解算,只适合线路较短(如 50 km)的情况,其相对误差小于 1%。但随着线路长度的增加,其影响逐渐严重,测量计算结果偏差大幅增加。

2)取补偿度 $\eta=1$,即对电容电流进行全补偿,在线路长度不大于 150 km 时,测量计算的线路自阻抗和互阻抗偏差大幅度降低,其相对误差小于 0.6%。但当线路长度超过 120 km 时,会造成过补偿。

3)取补偿度 $\eta=X_{cs}/(R_{cs}+X_{cs})$,即按照输电线路零序自电阻 R_{cs} 和零序自电抗 X_{cs} 的数值比来确定补偿度,测量计算精度最高。

在实际工程应用中,可以预先通过 PSCAD 获得零序自容纳的长线近似值 B 为补偿依据,再根据线路电压等级和长度选取合适的补偿度($0\leq\eta\leq 1$)。

表 2 电容电流对零序参数测量结果的影响与阻抗误差对比
Table 2 Comparison of impedance error and influence of capacitance current on the measuring result of zero-sequence parameters

线路长度/ km	阻抗 类型	作为基准的 长线修正阻抗/ Ω	无电容分量补偿 $\eta=0$		电容分量全补偿 $\eta=1$		部分电容分量补偿 $\eta=2/3$		以式(13)电容分量补偿	
			阻抗/ Ω	误差/ (%)	阻抗/ Ω	误差/ (%)	阻抗/ Ω	误差/ (%)	阻抗/ Ω	误差/ (%)
50	自阻抗	8.099 9+j60.845 1 Z =61.381 9	8.156 6+j61.180 7 Z =61.722 0	0.55	8.099 9+j61.040 8 Z =61.579	0.32	8.136 5+j61.087 4 Z =61.626 8	0.40	8.130 0+j61.057 2 Z =61.596 1	0.35
	互阻抗	6.872 9+j34.791 2 Z =35.464 0	6.906 8+j35.076 2 Z =35.749 7	0.81	6.886 2+j34.983 8 Z =35.655 1	0.54	6.893 1+j35.014 5 Z =35.686 6	0.63	6.888 6+j34.994 6 Z =35.666 2	0.57
100	自阻抗	16.088 0+j121.397 9 Z =122.459 3	16.416 8+j122.897 Z =123.988 6	1.24	16.119 9+j121.617 8 Z =122.681 5	0.18	16.217 8+j122.041 1 Z =123.114 0	0.53	16.154 2+j121.776 1 Z =122.842 9	0.31
	互阻抗	13.644 5+j69.364 4 Z =70.693 6	13.911 6+j70.505 6 Z =71.865 0	1.66	13.669 8+j69.542 9 Z =70.874 0	0.25	13.749 5+j69.861 3 Z =71.201 5	0.72	13.697 7+j69.654 4 Z =70.988 5	0.42
150	自阻抗	23.853 6+j181.367 7 Z =182.929 6	24.954 4+j185.764 6 Z =187.433 2	2.50	23.823 7+j181.153 9 Z =182.714 2	-0.12	24.191 0+j182.663 Z =184.258 6	0.73	23.949 9+j181.674 1 Z =183.245 9	0.17
	互阻抗	20.214 4+j103.502 8 Z =105.458 3	21.145 4+j106.749 8 Z =108.823 9	3.20	20.169 9+j103.123 2 Z =105.077 2	-0.36	20.486 2+j104.307 Z =106.300 4	0.80	20.278 5+j103.531 0 Z =105.498 3	0.04

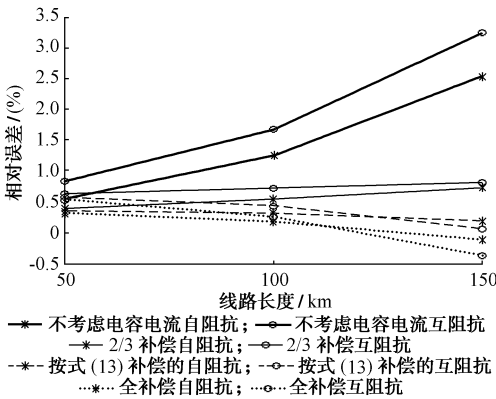


图 4 误差分布曲线
Fig. 4 Curves of error distribution

4 结语

通过线路首末端电气量计算得到的零序参数是输电线路集中等值参数,当线路长度超过一定距离后,不仅要考虑其分布参数特性,还要考虑电容电流对测量结果带来的影响。本文提出一种补偿算法,并在理论分析的基础上给出了具体的补偿度选取原则,通过仿真计算,验证了补偿算法的正确性。

参考文献

[1] 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.电力系统自动化,1995,19(2):18-25.
CHEN Yunping, WANG Xurui, HAN Baoliang. The principles and computer-based realization of zero-sequence parameter measurement of transmission line with mutual inductance. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(2): 18-25.
[2] 陈允平,张承学,胡志坚.以 GPS 为基础的线路参数带电测量.电力系统自动化,1998,22(6):43-45.
CHEN Yunping, ZHANG Chengxue, HU Zhijian. Zero-

sequence parameter measurement under operation of transmission line with mutual inductance based on GPS technology. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(6): 43-45.
[3] 陈慈萱.电气工程基础.北京:中国电力出版社,2003.
[4] 李裕能,夏长征.电路:下.武汉:武汉大学出版社,2004.
[5] 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.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. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(24): 32-35.
[6] 胡志坚,陈允平,张承学,等.宁夏电网 220 kV 互线路参数带电测量.电力系统自动化,2000,24(17):41-44.
HU Zhijian, CHEN Yunping, ZHANG Chengxue, et al. Live line measurement of parameter for 220 kV transmission lines with mutual inductance in Ningxia power network. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 41-44.
[7] 郭建全,胡志坚,郭建新,等.互感输电线路零序分布参数带电测量方法研究.高压电器,2005,41(6):425-427.
GUO Jianquan, HU Zhijian, GUO Jianxin, et al. Study on zero-sequence distributed parameter live line measurement of transmission lines with mutual inductance. High Voltage Apparatus, 2005, 41(6): 425-427.
[8] 胡志坚,陈允平,张承学.长距离高压电缆线路互感参数测量.高电压技术,2002,28(5):17-18.
HU Zhijian, CHEN Yunping, ZHANG Chengxue. Measurement of mutual inductances parameters of long-distance high-voltage cable lines. High Voltage Engineering, 2002, 28(5): 17-18.
[9] CHEN Yunping, ZHANG Xia. A study on mathematical model calculation and physical mechanism of transmission lines with mutual inductance// Proceedings of IEEE International Conference on Power System Technology, October 13-17, 2002, Kunming, China: 2116-2121.

(下转第 82 页 continued on page 82)

毛 鹏(1973—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统故障分析、继电保护原理,以及二次系统运行维护。E-mail: maopeng7073@vip. sina. com. cn

张承学(1952—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制及自动化。

王元媛(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向:电力系统自动化。

A Capacitive Current Compensation Algorithm on Zero-sequence Parameters Live Line Measurement of Transmission Lines

MAO Peng¹, ZHANG Chengxue², WANG Yuanyuan², BAI Richang¹, HU Zhijian², SHUAI Lingling¹

(1. Jiangxi Electric Power Company Extra-high Voltage Sub-company, Nanchang 330029, China;

2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Because of the importance of transmission line parameters and the complexity of factors influencing the parameters, the parameters, especially zero-sequence parameters should be practically measured. The distribution characteristics of the transmission lines are analyzed to get the lumped parameters model. Based on the increment method to measure the zero-sequence parameters, an improved algorithm is proposed to revise the parameter measurement by using the capacitive current component. The compensation foundation is established and formula of compensation degree symbolized with η is also given. Theoretical analysis shows that the compensation algorithm can improve the measurement accuracy. Finally, the simulation model of a high voltage transmission line with mutual inductance is developed in PSCAD to validate this new algorithm with the chosen compensation degree for improvement of the measurement accuracy.

Key words: transmission line; zero-sequence parameters; live line measurement; capacitance current compensation; PSCAD