

# 电网电容电流的最小二乘法辨识算法

刘毅敏, 高广峰

(山西省阳泉市供电分公司, 山西 阳泉 045000)

**摘要:** 介绍一种测量计算电网电容电流的新方法。该方法不同于传统测量方法, 是在信号注入法的基础上, 结合系统辨识理论, 从 PT 二次侧进行采样, 通过输入和输出间的数学模型, 采用递推式最小二乘法进行辨识计算, 最终计算出电网电容电流。辨识算法的程序开发选用 DSP 芯片, 采用 C 语言编程, 能够达到较高的辨识速度和精度要求。最后, 运用 Matlab 对电压互感器 PT 回路的建模, 在 CCS2.20 中仿真运行递推式最小二乘法算法程序, 通过试验证实了这种方法的精确性和实时性。

**关键词:** 电容电流; 信号注入法; 系统辨识; 最小二乘法; DSP

## Least square identification algorithm of capacitive current in power grid

LIU Yi-min, GAO Guang-feng

(Yangquan Power Supply Branch, Yangquan 045000, China)

**Abstract:** This paper introduces a new method of measuring capacitive current in power grid. This method is different from the other traditional methods. It is based on the signal injection method and combined with the theory of system identification, sampling data from the secondary side of PT, through the mathematical model between the input and the output, at last, using recursive least square method to identify and calculate the capacitive current. DSP chip is selected to finish the identification algorithm's program development and C language is adopted for programming, so as to achieve a higher speed and accuracy of identification requirements. Finally, this paper uses the model of PT circuit which is established by Matlab and runs recursive least square algorithm program in CCS2.20 to simulate, to experimentally confirm the accuracy and real-time of this method.

**Key words:** capacitive current; signal injection method; system identification; least square method; DSP

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)08-0049-04

## 0 引言

目前, 我国 10~35 kV 系统中性点不接地或经消弧线圈接地(称为小接地电流系统)的方式为主。中性点不接地方式的显著优点是, 系统在发生单相接地故障(约占 60%以上)时, 可以短时继续运行。但是, 此时由于电容电流的存在, 就有可能引发间歇性弧光接地、铁磁谐振、中性点位移过电压等, 甚至发展为事故。随着城市建设及城市电网改造, 城市变电站大量采用了电力电缆送电线路, 而在相对落后的农村地区, 虽然农网改造已经大大地改善了当地的供电条件, 但仍存在配电系统供电半径过大等问题。这些情况都会造成变电站不接地系统电容电流过大, 弧光过电压时有发生, 严重影响了系统和人身安全以及对用户的可靠供电。

电网电容电流的大小是决定是否装设消弧线圈以及消弧线圈调谐的依据, 为了掌握电容电流增

长变化情况以及正确设定消弧线圈补偿的档位, 准确测量系统电容电流是非常必要的。

电容电流的测量可采用直接法和间接法。直接法由于对试验人员和配网系统均存在很多不安全的因素, 现在几乎不再采用了。目前广泛采用的是分相外加电容法和变压器中性点外加电容法等间接法。但是这些测量方法都要接触到高压一次侧, 且存在操作繁琐、准备工作耗时长、测量工作效率低等缺点<sup>[1]</sup>。

基于上述原因, 本文介绍一种采用参数辨识原理测量电容电流的新方法。新方法采用注入信号法与递推式最小二乘法辨识相结合的方案, 从 PT 二次侧进行采样, 通过输入和输出间的数学模型, 辨识计算出电网电容电流。

## 1 辨识算法的测量原理

### 1.1 注入信号法

首先, 需要明确电容电流辨识的关键——信号注入法与最小二乘法辨识之间的关系。最小二乘法是一种系统辨识方法, 用在这里是为了辨识电力系统的接地电容。然而, 只有在一个系统模型中包括进去电力系统的接地电容, 才能运用最小二乘法进行包括接地电容在内的系统参数的辨识。这里面的电力系统模型就是在信号注入法的实现方案中得到体现的。信号注入法运用到电压互感器 PT, 就包括了对电压互感器 PT 回路的电路等效与建模。运用这个电路模型作为目标系统模型, 用注入信号角频率  $\omega$  作为系统输入, 用测量到的回路阻抗  $Z$  和相角  $\theta$  作为系统输出, 那么最小二乘法就能够对此系统发挥作用, 有效地辨识到电压互感器 PT 回路的电路参数, 得到接地电容, 进而求得电容电流<sup>[2]</sup>。具体方案设计如图 1 所示。

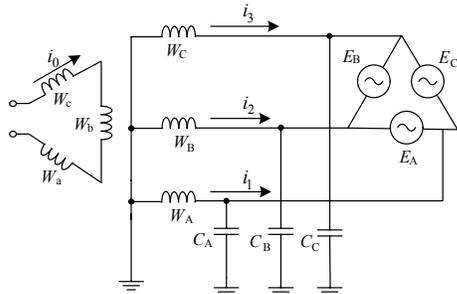


图 1 测量原理图  
Fig. 1 Principle of measurement schematics

图中  $W_A$ 、 $W_B$ 、 $W_C$  分别为电压互感器 (PT) 三相的高压绕组, 二次绕组  $W_a$ 、 $W_b$ 、 $W_c$  组成开口三角形;  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  为三相导线对地电容。若在 PT 开口三角端注入一恒定电流  $i_0$ , 就会有 3 个大小相等、相位相同的电流  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  从 PT 的高压侧流出, 这 3 个电流将分别在 PT 三相的绕组电阻  $R$ 、漏抗  $X_L$  和导线对地电容上产生压降。根据图 2 所示的 PT 等值电路, 可得:

$$u_A = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C} \int i_1 dt \quad (1)$$

一般地, 三相 PT 的参数 (绕组电阻  $R$  和漏抗  $X_L$ ) 是对称的, 而且三相导线对地电容  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  也是基本相等的, 因此三相电流  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  分别在三相 PT 与导线对地电容中产生的压降是基本相同的, 即  $u_A = u_B = u_C$ , 这时在 PT 开口三角端就可以测得一零序电压  $u_0$ 。

$$u_0 = 3 \frac{n_2}{n_1} u_A, \quad i_1 = \frac{n_2}{n_1} i_0 \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1), 得:

$$u_0 = 3 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left( Ri_0 + L \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int i_0 dt \right) \quad (3)$$

式(3)中:  $i_0$ 、 $u_0$  为输入和输出变量;  $R$ 、 $L$  和  $C$  为待辨识参数。这样, 问题就转化为参数辨识问题<sup>[3]</sup>。

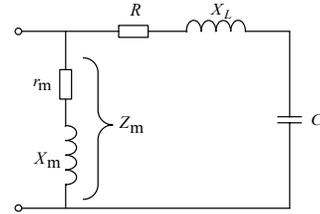


图 2 PT 的等值电路图

Fig. 2 PT equivalent circuit

### 1.2 递推式最小二乘法

递推式最小二乘法的计算方法是这样的。一般最小二乘法计算系统参数的公式为

$$\hat{\Phi} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

那么, 在进行第  $N+1$  次数据观测后, 有

$$\hat{\Phi}_{N+1} = (X_{N+1}^T X_{N+1})^{-1} X_{N+1}^T Y_{N+1} \quad (5)$$

经过推导可以将递推算法的公式总结为:

$$\begin{cases} \gamma_{i+1} = (1 + X_{i+1}^T P_i X_{i+1})^{-1} \\ K_{i+1} = \gamma_{i+1} P_i X_{i+1} \\ P_{i+1} = P_i + K_{i+1} (Y_{i+1} - X_{i+1}^T \hat{\Phi}_i) = (I - K_{i+1} X_{i+1}^T) P_i \end{cases}$$

$$\hat{\Phi}_{i+1} = \hat{\Phi}_i + K_{i+1} (Y_{i+1} - X_{i+1}^T \hat{\Phi}_i) \quad (6)$$

其中:  $P_i = (X_i^T X_i)^{-1}$ ,  $\gamma_{i+1} = (1 + X_{i+1}^T P_i X_{i+1})^{-1}$ ,  $K_{N+1} = \gamma_{N+1} P_N x_{N+1}$  为增益矩阵<sup>[4]</sup>。

式 (3) 描述了系统输入  $i_0$ , 系统输出  $u_0$  与系统参数  $R$ 、 $L$ 、 $C$  的关系。但是其中电气量的微分, 积分算子, 不易进行数值化和系统实现<sup>[5]</sup>。所以, 这里对公式 (3) 进行了变形。首先, 对式 (3) 由时域变换到频域, 微分算子  $d/dt$  变换为  $j\omega$ , 积分算子  $\int dt$  变换为  $1/j\omega$ , 得到:

$$\dot{U}_0 = 3 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left( R + j\omega L - j \frac{1}{\omega C} \right) \dot{I}_0 \quad (7)$$

式中:  $\dot{U}_0$  是 PT 开口端的电压频域变量;  $\dot{I}_0$  是 PT 开口端的电流频域变量;  $\omega$  是注入信号的角频率。接着, 对上式  $\dot{I}_0$  移到左边, 公式两边取虚部, 进一步变形为

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = Z \cdot \sin \theta \quad (8)$$

其中:  $Z = |Z| = \left| \frac{1}{3} \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} \right|$  为阻抗模,  $\theta$  为阻抗

相角,  $n_1$ 、 $n_2$  分别是电压互感器 PT 的高、低压绕组匝数。

这里信号注入法的测量对象是  $\omega$ ,  $U_0$  和  $I_0$ 。通过测量 PT 开口端特定频点处的  $U_0$ 、 $I_0$  就可以求得  $Z$  和  $\sin\theta$ 。获得 PT 等效回路的电路模型, 测出了  $\omega$ ,  $Z$  和  $\sin\theta$ , 接下来的工作就是运用最小二乘法对电路模型中的  $L$ ,  $C$  系统参数进行辨识, 得到电力系统接地电容。递推式最小二乘法辨识的目标是获得系统参数  $L$ ,  $C$ , 记为  $\hat{\Phi} = (L, C)$ , 系统输入为注入信号的角频率  $\omega$  和其倒数  $1/\omega$ , 记为  $X = (\omega, 1/\omega)$ , 系统输出为等效阻抗的模  $Z$  和相角  $\theta$ , 记为  $Y = Z \sin\theta$ 。递推式最小二乘法的算法流程如图 3 所示。

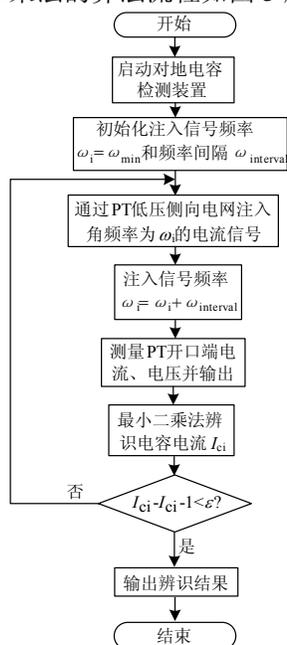


图 3 递推式最小二乘法的算法流程

Fig. 3 Flow chart of the recurrence least square algorithm

递推过程是这样的: 在 PT 开口三角侧注入角频率  $\omega$  逐渐变化的电流信号。在 10~200 Hz 的范围里, 经过大量仿真实验和计算比较, 最终选择扫频范围 10~181 Hz 之间的 20 个频点, 各频点间隔 9 Hz, 作为注入信号的频率。不断地读取系统输入  $X$  和相应的输出  $Y$ ,  $i$  时刻读取的一对输入、输出记为  $(X_i, Y_i)$ 。每次读取一对  $(X_i, Y_i)$ , 用最小二乘法计算出当前迭代的系统参数  $\hat{\Phi}_i$ 。如此循环, 直到系统参数  $\hat{\Phi}_n$  与系统参数  $\hat{\Phi}_{n+1}$  之差的绝对值小于一个非常小的正数  $\varepsilon$ , 那么迭代结束, 取得系统辨识参数  $\hat{\Phi}_n = (L_n, C_n)$ 。最后, 计算出电网电容电流  $I_c = 3\omega CU_{\text{相}}$ 。

## 2 电容电流辨识算法实现

最小二乘法辨识电容电流的实现主要是完成辨识算法程序, 并将其加载到 DSP 芯片中。辨识电容电程序的目标器件选用 TMS320LF2407 芯片, 采用 C 语言进行开发, 不仅能够方便地实现算法的编程, 而且也能够达到较高的辨识速度, 不会影响电容电流辨识的实时性。在前面设计的辨识算法的基础上, 可以比较容易地制定出辨识电容电流的程序流程, 如图 4 所示。

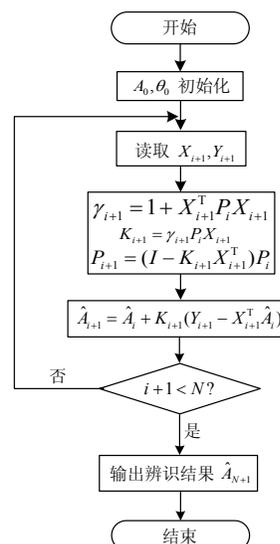


图 4 递推式最小二乘法程序流程

Fig. 4 Flow chart of the program of the recurrence least square method

其中, 程序运行的终止条件可以根据系统要求和实际情况而定。如果对辨识电力系统电容电流的反应时间有规定, 那么可以设定迭代次数不超过  $N$ 。经过多次仿真实验和计算, 这里  $N$  一般可取 10, 就可以使系统辨识结果具有较高精度。如果对辨识电力系统电容电流的精度有较高要求, 那么可以设置辨识系统参数  $\hat{\Phi}_n$  和下一次的参数  $\hat{\Phi}_{n+1}$  之差的绝对值小于一个非常小的正数  $\varepsilon$ , 那么迭代结束。一般地,  $\varepsilon$  可以取  $10^{-4}$ , 所用的辨识迭代次数通常在 10 次以内。另外, 最小二乘法程序中涉及到对矩阵的较多操作, 比如辨识算法中  $P_i X_{i+1}$  是  $n \times n$  方阵和  $1 \times n$  向量相乘,  $(I - K_{i+1} X_{i+1}^T) P_i$  是两个  $n \times n$  方阵的乘积,  $P_i = (X_i^T X_i)^{-1}$  需要进行矩阵求逆运算。程序中对各种类型的矩阵运算进行了单独编程, 并且用函数进行实现, 从而能将辨识过程进行明确划分, 更好地执行辨识流程。

### 3 电容电流辨识算法仿真

这里,我们给出 CCS2.20 中 TMS320LF2407 芯片完成电容电流辨识仿真的过程和结果。CCS2.20 是 TI 推出的用于开发其 DSP 芯片的集成开发环境。它采用 Windows 风格界面,集编辑、编译、链接、软件仿真、硬件调试及实时跟踪等功能于一体,极大地方便了 DSP 程序的设计与开发。对电压互感器 PT 回路的建模采用 Matlab 实现,仿真并获得 PT 开口端的等效回路的各次电流  $I_i$  和电压  $U_i$ ,从而计算得到各个角频率相应的电路阻抗值  $Z\sin\theta$ 。根据各次电流  $I_i$  和电压  $U_i$ ,在 CCS2.20 中仿真运行递推式最小二乘法算法程序,然后我们就可以在 CCS2.20 中设置断点,监测到程序辨识到的接地电容,从而验证 DSP 的电容电流辨识程序的正确性。

在 PT 开口端输入 10~181 Hz,频率间隔为 9 Hz,幅度为 1 A,相位为  $0^\circ$  的 20 个电流信号  $I_i$ 。在每输入一个电流信号之后,根据 PT 开口端测量到的电压值,就可以计算等效阻抗值  $Z\sin\theta$ 。各个角频率对应的电路阻抗值  $Z\sin\theta$  见表 1 所示。

表 1 20 个测到的  $Z\sin\theta$  和电容辨识结果

Tab. 1 Twenty values of  $Z\sin\theta$  and corresponding reorganization results of capacitance

角频率/Hz	阻抗 $Z\sin\theta$	辨识结果	
		L/H	C/F
10	-3 273.333 333	-327.300 629	0.305 53
19	-1 640.385 965	6.163 818	0.000 03
28	-1 022.476 19	5.999 173	0.000 03
37	-678.900 900 9	5.999 756	0.000 03
46	-448.637 681 2	5.999 885	0.000 03
55	-276.060 606 1	5.999 934	0.000 03
64	-136.833 333 3	5.999 957	0.000 03
73	-18.621 004 57	5.999 97	0.000 03
82	85.495 934 96	5.999 978	0.000 03
91	179.699 633 7	5.999 983	0.000 03
100	266.666 666 7	5.999 987	0.000 03
109	348.189 602 4	5.999 989	0.000 03
118	425.514 124 3	5.999 991	0.000 03
127	499.532 808 4	5.999 992	0.000 03
136	570.901 960 8	5.999 993	0.000 03
145	640.114 942 5	5.999 994	0.000 03
154	707.549 783 5	5.999 994	0.000 03
163	773.501 022 5	5.999 995	0.000 03
172	838.201 550 4	5.999 995	0.000 03
181	901.837 937 4	5.999 996	0.000 03

然后,把电流注入法检测到的各次电路等效阻抗  $Z$  和相角  $\theta$  作为输入在 CCS2.20 中运行递推式最

小二乘法程序,检测接地电容  $C$ 。表 1 中列出了辨识的结果。由表 1 可见系统对电感  $L$  的辨识误差从第三代开始都在 1% 以内,而对电容  $C$  的辨识误差则在第一次辨识就达到 1% 以内。

由此,我们可以看到,这里实现的递推式最小二乘法辨识电容电流具有较高的辨识效率,而且相比一般最小二乘法,可以使系统计算开销降低,辨识速度提高。

### 4 结论

本文实现的接地电容电流辨识的实现方案具有一定创新性。这里辨识算法首先对电力系统加入了电压互感器 PT,并且建立了电力系统的等效模型和系统方程。辨识所需的电力系统状态的获取是通过信号注入法获得的,而对系统参数的辨识中使用的是递推式最小二乘法。本文在接地电容电流辨识中创新性地对 PT 等效回路的电路方程进行了变换,使得其中的系统输入、输出变量的采集、获取比较容易实现。此外,本文电路系统参数的求解运用了递推式最小二乘法,它的特点是能够实时、在线辨识系统参数,满足消弧线圈实时补偿电力系统电容电流的要求。

### 参考文献

- [1] 孙结中, 蒋学军. 配电系统电容电流测试仪的研制[J]. 广西电力, 2006(2): 1-4.  
SUN Jie-zhong, JIANG Xue-jun. Development of Capacitive Current Tester in Distribution System [J]. Guangxi Electric Power, 2006(2): 1-4.
- [2] 赵正军, 姜新宇. 信号注入法在配电网电容电流测量中的研究[J]. 广东电力, 2005, 17(6): 25-28.  
ZHAO Zheng-jun, JIANG Xin-yu. Research of Signal Injection Method used in the Measurement of Capacitive Current in Distribution Network[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 17(6): 25-28.
- [3] 徐宁寿. 系统辨识技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.  
XU Ning-shou. System Identification Technology and Its Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [4] 陈自宽, 母国光. 相关数据集的最小二乘处理方法[J]. 数据采集与处理, 2007, 11(1): 66-68.  
CHEN Zi-kuan, MU Guo-guang. Least Square Method Sets to Deal with the Related Data[J]. Data Acquisition and Processing, 2007, 11(1): 66-68.

(下转第 58 页 continued on page 58)

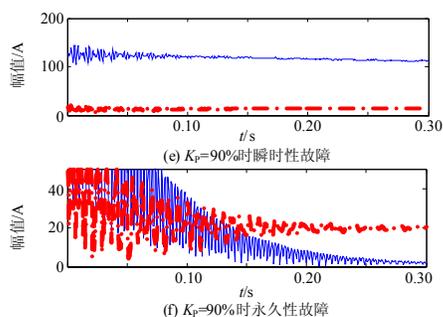


图 8 不同并联补偿度下仿真结果

Fig.8 Results under different shunt compensation

图8的结果表明，在线路在不同补偿度的情况下，瞬态性和永久性故障的电流自由分量幅值特征差异显著，能够可靠区分故障性质。对于判别初始阶段受暂态过程影响较大，可通过延长判别时间提高判别结果的可靠性。

由于篇幅有限，本文只给出了两端带并抗补偿线路的典型故障情况下的算法仿真验证；对于一端带并抗补偿线路，本文所提判据同样适用。

### 5 结论

提出一种适用于带并联电抗器线路的单相故障性质识别实用算法，具有以下特点：①利用获取精度高的并联电抗器电流量，不滤除低频分量，降低了滤波要求；②计算量较小，降低了对硬件计算速度的要求；③基本不受系统运行方式、故障位置、过渡电阻及负荷电流的影响。

### 参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.

[2] 李斌, 李永丽, 黄强, 等. 单相自适应重合闸相位判据的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 41-44. LI Bin, LI Yong-li, HUANG Qiang, et al. Study on Phase Criterion for Single-pole Adaptive Reclosure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 41-44.

[3] 刘浩芳, 王增平, 等. 带并联电抗器的超/特高压输电

线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 29-34.

LIU Hao-fang, WANG Zeng-ping, et al. Criterion for Determining Fault Nature in Adaptive Single-Phase Reclosing for Shunt Compensated EHV/UHV Transmission Lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 29-34.

[4] 李斌, 李永丽, 曾志安, 等. 基于电压谐波信号分析的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 53-57.

LI Bin, LI Yong-li, ZENG Zhi-an, et al. Study on Single-pole Adaptive Reclosure Based on Analysis of Voltage Harmonic Signal[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 53-57.

[5] 刘浩芳, 王增平, 刘峻岭. 带并补的超高压输电线路单相自适应重合闸新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 62-66.

LIU Hao-fang, WANG Zeng-ping, LIU Jun-ling. A New Criterion for Single-phase Adaptive Reclosure of Shunt Reactor Compensated EHV Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 62-66.

[6] 索南加乐, 宋国兵, 邵文权, 等. 两端带并联电抗器输电线路永久性故障判别[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(20): 56-60.

SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, SHAO Wen-quan, et al. Identification of Permanent Faults Based on Differential Current Protection for Transmission Lines with Two Shunt Reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(20): 56-60.

收稿日期: 2009-03-02; 修回日期: 2009-12-15

#### 作者简介:

石光 (1971-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护技术工作;

邵文权 (1978-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事输电线路继电保护及自适应重合闸研究; E-mail: swq0426@stu.xjtu.edu.cn

索南加乐 (1960-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事新型继电保护技术研究。

(上接第 52 页 continued from page 52)

[5] 周西峰. 系统辨识与建模方法[J]. 信息与控制, 2006, 4(2): 131-138. ZHOU Xi-feng. System Identification and Modeling Methods[J]. Information and Control, 2006, 4(2): 131-138.

收稿日期: 2009-05-14; 修回日期: 2009-06-01

#### 作者简介:

刘毅敏 (1974-), 男, 高级工程师, 从事继电保护工作;

高广峰 (1980-), 男, 助理工程师, 从事继电保护工作。

E-mail: 2000ggf@sina.com