

# 基于零序PT二次侧注入信号的配电网电容电流测量新方法

宋晓燕<sup>1</sup>, 孙岩洲<sup>1</sup>, 宋紫嫣<sup>2</sup>, 梁京<sup>3</sup>

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南省电力公司濮阳供电公司, 河南 濮阳 457000; 3. 煤炭工业郑州设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 在相量法的基础上, 为了解决其测量系统对地电容范围小和频率组合选取困难的问题, 改进了测量配电网电容电流的方法, 并给出了新方法的频率选取和误差分析。改进后的方法提出在PT开口三角侧分别注入一个高频和一个低频的幅值恒定的电压信号, 并测量开口三角侧的零序电流。根据等效电路, 计算出配电网对地电容。理论分析和仿真试验表明: 改进后的测量方法具有计算简便、测量精度高, 同样适用于测量较大系统的对地电容等特点, 使得中压配电网电容电流的测量更加准确、快捷。

**关键词:** 对地电容; 配电网; 相量法; 电容电流测量; 频率

## A new method of distribution network capacitive current measurement based on injecting signals into the secondary side of the zero sequence PT

SONG Xiao-yan<sup>1</sup>, SUN Yan-zhou<sup>1</sup>, SONG Zi-yan<sup>2</sup>, LIANG Jing<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;  
2. Puyang Power Supply Company, Henan Electric Power Company, Puyang 457000, China;  
3. Zhengzhou Design & Research Institute of Coal Industry, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the scope of the measurement range of capacitance is limited and to select the proper frequency is difficult, based on the phasor method, a novel method is proposed and the frequency selection and error analyses are given as well. In the improved method, a high and a low frequency amplitude constant voltage signals are injected into PT open delta side, and the zero sequence current of the open the triangle side is measured. According to the equivalent circuit of the distribution network, the capacitance is calculated. Through theoretical analysis and simulation verification, the improved method has the advantages of simple operation and high measuring precision, and is suitable for the capacitance measurement of larger systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1204506).

**Key words:** capacitance to ground; distribution network; phasor method; capacitive current measurement; frequency

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0134-05

## 0 引言

城市配电网的不断扩大, 尤其是电缆线路的大面积应用, 使得中性点不接地的中压配电网对地电容达到十几微法甚至几十微法, 线路对地电容电流日益增大, 导致配电网单相接地故障时电弧难以自动熄灭, 进而引发相间短路。电力系统运行规程规定: 当10 kV和35 kV电网电容电流分别大于20 A和10 A时, 应装设消弧线圈补偿电容电流。因此, 对于一个电力系统来说, 是否应该安装消弧线圈,

安装多大容量的消弧线圈, 取决于配电网电容电流的大小<sup>[1-6]</sup>。

信号注入法是近年来一直备受关注的电容电流测量方法, 尤其适用于电网不对称度小的系统。在线检测电容电流值, 具有安全性高, 测量方便, 精确度高等优点。根据信号注入法的测量原理, 可将其分为三频法、双频法及扫频法等方式<sup>[7-13]</sup>。文献[7]提出了一种三频法, 即从电压互感器开口三角侧注入三个频率不同的电流信号, 测量开口三角侧电压幅值, 利用标量计算得到三个方程, 求解电网电容值。该方法计算复杂, 受互感器漏阻抗影响较

大, 具有一定的局限性。文献[8-9]介绍了一种双频法, 即向配电网母线电压互感器开口二次侧注入两个不同频率的恒流信号, 测量三角开口侧电压幅值与相位, 利用相量方法列写方程组得到系统对地电容值。但是该方法测量范围小, 频率选取困难。文献[10]提出一种扫频法, 即在零序电压互感器开口三角侧串联一个可调电感, 通过注入一个变频恒流的信号寻找配电网的谐振频率, 改变可调电感的数值寻找另一谐振频率, 联立两个谐振方程求解电容电流。该方法中电感值的选取直接影响到最终测量结果的准确度, 实际操作起来比较复杂。

为了提高测量精度, 简化计算, 提高测量系统对地电容的范围, 本文提出了一种改进的双信号注入法, 经理论推导和仿真分析验证了该方法的可行性。

## 1 改进的双信号注入法的测量原理

### 1.1 传统相量法的分析

传统相量法的计算公式<sup>[8]</sup>为

$$C = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \omega_2^2 \text{Im} Z_1 - \omega_2 \omega_1^2 \text{Im} Z_2} \quad (1)$$

式(1)中有四个参变量 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\text{Im} Z_1$ 、 $\text{Im} Z_2$ ,  $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 分别表示两次注入信号的频率,  $\text{Im} Z_1$ 和 $\text{Im} Z_2$ 分别表示计算阻抗的虚部。由数学误差理论, 对式(1)先取对数再求偏导, 进而再对 $C$ 求出由于计算、测量而可能导致的最大相对误差 $\varepsilon_c$ <sup>[11]</sup>:

$$\varepsilon_c = \left| \frac{1}{\frac{\omega_2 \text{Im} Z_1}{\omega_1 \text{Im} Z_2} - 1} \right| \varepsilon_{\text{Im} Z_2} + \left| 1 + \frac{1}{\frac{\omega_2 \text{Im} Z_1}{\omega_1 \text{Im} Z_2} - 1} \right| \varepsilon_{\text{Im} Z_1} + \left| \frac{2}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} - 1 - \frac{1}{\frac{\omega_2 \text{Im} Z_1}{\omega_1 \text{Im} Z_2} - 1} \right| \varepsilon_{\omega_1} + \left| \frac{2}{1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} + \frac{1}{\frac{\omega_2 \text{Im} Z_1}{\omega_1 \text{Im} Z_2} - 1} \right| \varepsilon_{\omega_2} \quad (2)$$

对式(2)分析可得, 在一定范围内 $\omega_1$ 与 $\omega_2$ 相差越大, 各项分母越大, 从而 $\varepsilon_c$ 越小。因此本文从频率选取上进行改进, 讨论如何选取合适的频率组合, 以减小最大相对误差 $\varepsilon_c$ 。

### 1.2 改进的双信号注入法的原理分析

测量原理图如图1所示<sup>[7-8]</sup>。

图1中,  $U_0$ 为从PT开口三角侧注入的电压信号<sup>[13]</sup>,  $I_0$ 是开口三角侧流出的电流,  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 和 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{U}_3$ 分别表示在PT高压星型侧感应出的三相电

流和电压,  $C$ 表示配电网单相对地电容, 电压互感器变比为 $k$ 。由传统信号注入法原理分析得出, 某一相折算至高压侧的等效电路如图2所示。图中 $R$ 为电压互感器漏电阻,  $L$ 为互感器漏电感。

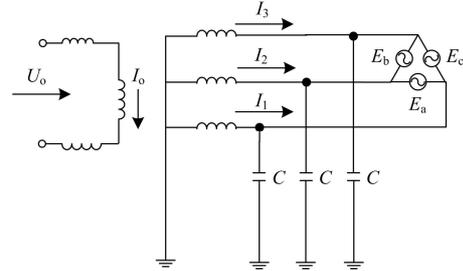


图1 配电网电容电流测量原理图

Fig. 1 Diagram of the capacitance current measurement

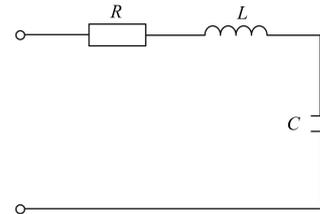


图2 配电网电容电流测量的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of capacitance measurement

由原理分析得

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_3}{k} = \frac{3\dot{I}_0 \left[ R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \right]}{k^2} \quad (3)$$

以简化计算, 减小误差为目的, 本方法的基本思路是: 首先在PT开口三角侧注入一个低频恒定的电压信号 $\dot{U}_{01}$ , 频率为 $\omega_1$ , 幅值为 $U_0$ , 测量开口三角侧电流 $\dot{I}_{01}$ ; 然后注入一个高频恒定的电压信号 $\dot{U}_{02}$ , 频率为 $\omega_2$ , 幅值为 $U_0$ , 让这个频率可以大到使对地容抗相对于互感器漏电感忽略不计。工频情况下, 感抗约为数千欧, 容抗约为数百欧, 若使频率高达数千赫兹, 感抗与容抗将相差5个数量级以上, 在此情况下完全可以忽略容抗。测量此时开口三角侧电流 $\dot{I}_{02}$ 。结合等效电路图, 利用相量计算, 可得

$$\text{Im} Z_1 = \text{Im} \frac{k^2}{3} \cdot \frac{\dot{U}_{01}}{\dot{I}_{01}} = \omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} \quad (4)$$

$$\text{Im} Z_2 = \text{Im} \frac{k^2}{3} \cdot \frac{\dot{U}_{02}}{\dot{I}_{02}} = \omega_2 L \quad (5)$$

系统单相对地电容 $C$ 为

$$C = \frac{1}{\omega_1 \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \operatorname{Im} Z_2 - \operatorname{Im} Z_1 \right)} \quad (6)$$

## 2 误差分析和测量信号的频率选取

### 2.1 改进的双信号注入法的误差分析

将改进的式(6)与传统的相量法计算公式(1)进行误差分析,求改进后 $C$ 的相对误差 $\varepsilon_r$ ,可得<sup>[11]</sup>

$$\varepsilon_r = \frac{\frac{\omega_1}{\omega_2} - \frac{\operatorname{Im} Z_1}{\operatorname{Im} Z_2}}{\frac{\omega_1}{\omega_2} - \frac{\omega_2}{\omega_1} - \left[ 1 - \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right] \cdot \frac{\operatorname{Im} Z_1}{\operatorname{Im} Z_2}} \quad (7)$$

从式(7)知, $\omega_1$ 与 $\omega_2$ 相差越大, $\varepsilon_r$ 越小,与之前对传统相量法的误差分析得出的结论一致。因此在减小式(2)误差 $\varepsilon_c$ 的同时,尽量减小式(7)误差 $\varepsilon_r$ 。也就是在达到简化计算目的的同时,也使得改进方法的误差降低到最小。

### 2.2 测量信号的频率选取

信号注入法频率选取的一般规律是<sup>[9]</sup>:若频率选择较高,则漏抗较大,容抗较小。由于是通过测量整个串联回路的阻抗 $Z$ 来计算电容值,如果 $X_C$ 相对于 $X_L$ 很小,阻抗 $Z$ 的微小测量误差就会导致很大的电容计算误差,也就是说,试图通过测量一个大的量值来提取出一个小的量值是很困难的。频率选取越低,越能增大 $X_C$ 对 $X_L$ 的比重,越能增加计算的稳定度。但频率选择也不能过低,频率太低就不能忽略PT励磁回路的影响,因此必须综合考虑上述两个因素才能选择合适的注入频率。

本文在频率选取的原则上标新立异:一个频率选得极高(但不能过高,如果频率过高,会使得测得的开口三角侧零序电流很小,微弱的信号会导致测量误差比较大),有意使对地容抗相对于漏抗可以忽略不计,相差很大的数量级,在误差允许的范围内从而简化计算;根据误差分析得知,另外一个频率要选取的相对较小,但是又不能太小,过低的频率会使得励磁阻抗不能忽略。

本文通过在Matlab环境下进行仿真,针对不同的系统对地电容,以及在输入不同的频率下,得到电容电流与注入频率的关系。结合电网对地电容的实际变化范围,设置单相对地电容分别为0.2  $\mu\text{F}$ 、2  $\mu\text{F}$ 、20  $\mu\text{F}$ 。注入信号输入频率范围是10~20 Hz。

由图3可知,考虑对地电容0.2~20  $\mu\text{F}$ 的变化,在注入1500 Hz以及更高的频率下,零序电流基本相等,甚至在2000 Hz曲线基本重合。则进一步说明,在注入高频信号时,系统的对地容抗已经可以

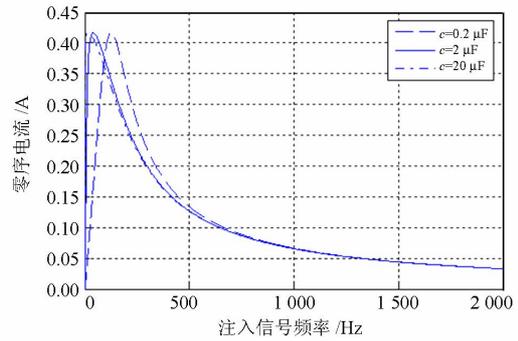


图3 零序电流与频率关系的曲线图

Fig. 3 Relation graph of zero sequence current and frequency

忽略不计,只有漏阻抗在起作用。

由分析得知,此方法不仅适用于对地电容小的系统,同样适用于对地电容较大的系统,系统对地电容越大,在较高频率下容抗值越容易忽略,能满足当今电网急速发展的需求。

根据上述误差分析和频率选取分析,本文根据以往经验,选取低频为10~20 Hz<sup>[7,11]</sup>;由于过高的频率会使得二次侧返回的电流信号过于微弱,导致误差增大,故选取高频为2000 Hz。

## 3 仿真试验

本文的仿真在Matlab/Simulink环境下进行,利用Simulink环境下已有的模块建立配电网电容电流测量的仿真模型进行仿真试验。在仿真试验中,模拟10 kV配电网,采用集中电容代替线路的对地分布电容,单相对地电容设置为10  $\mu\text{F}$ ,注入1 V的恒定电压信号,设置电压互感器漏电阻折算至一次侧共约为8000  $\Omega$ ,漏电感折算至一次侧共约为8 H,变比 $k=100$ 。高频设置为200 Hz和2000 Hz,低频设置为:10 Hz、20 Hz、30 Hz和60 Hz,通过仿真计算得到结果如表1所示。

针对不同的对地电容,预设系统电容分别为1  $\mu\text{F}$ 、5  $\mu\text{F}$ 、10  $\mu\text{F}$ 、20  $\mu\text{F}$ 和40  $\mu\text{F}$ ,通过选取一高一低不同的频率组合,分别仿真计算系统的对地电容,计算得出的结果如表2所示。

(1) 表1给出了仿真测量系统对地电容不可缺少的计算数据,也就是计算系统对地电容简要的过程。本文的注入信号由传统的恒定电流信号改为恒定的电压信号,主要是为了防止输入高频恒流信号时,在二次侧产生过电压。

(2) 由表2可以对比看出,结果符合“ $\omega_1$ 与 $\omega_2$ 相差越大,计算电容的相对误差越小”的一般规律,也可以得出10/2000 Hz的频率选取是较好的组合,

而 60/200 Hz 是较差的频率选取组合。

表 1 采用改进的信号注入法得到的数据

Table 1 Data got from the improved signal injection method

频率/Hz	测量得到的电流/A	注入的电压/V	计算得到的阻抗虚部/ $\Omega$
10	$0.4133\angle 7.75^\circ$	$1\angle 0^\circ$	-1 087.60
0	$0.4167\angle -1.5^\circ$	$1\angle 0^\circ$	209.40
30	$0.4135\angle -6.97^\circ$	$1\angle 0^\circ$	978.23
60	$0.3935\angle -19.0^\circ$	$1\angle 0^\circ$	2 757.9
200	$0.2592\angle -51.66^\circ$	$1\angle 0^\circ$	10 085.6
2 000	$0.0329\angle -86.85^\circ$	$1\angle 0^\circ$	101 153.9

表 2 测量结果的相对误差

Table 2 Relative error of the measurement result

选取不同 频率组合	选取不同的系统单相相对地电容					
	1 $\mu\text{F}$	5 $\mu\text{F}$	10 $\mu\text{F}$	15 $\mu\text{F}$	20 $\mu\text{F}$	40 $\mu\text{F}$
10/2000	0.002 7	0.000 9	0.000 1	0.000 9	0.002 4	0.005 4
20/2000	0.002 8	0.003 3	0.005 3	0.010 6	0.005 7	0.029 0
30/2000	0.000 1	0.005 0	0.010 7	0.010 3	0.022 8	0.043 1
60/2000	0.003 8	0.017 0	0.022 8	0.019 0	0.011 1	0.014 2
10/200	0.002 9	0.001 5	0.002 1	0.003 9	0.006 3	0.013 2
20/200	0.003 1	0.007 2	0.013 1	0.022 0	0.021 1	0.057 8
30/200	0.001 9	0.013 7	0.027 8	0.035 7	0.055 6	0.103 9
60/200	0.010 8	0.050 1	0.086 2	0.080 8	0.132 8	0.229 9

同样也可以得出, 改进的测量方法不仅适用于对地电容小的系统, 同样适用于对地电容较大的系统。经计算得出, 所有 10/2 000 Hz 频率组合得到的电容的相对误差均不超过 0.006, 满足工程要求。

## 4 结论

本文中改进的新方法采用相量计算, 同时也简化了计算公式; 改进的双信号注入法采用注入一高一低的频率, 解决了频率组合选取的问题, 本文中理论分析和仿真结果表明两个频率相差较大, 有利于减小误差。此方法适用于电容变化较大的配电网, 符合当今电网发展的需求。同时应该注意, 一般的运行系统在 PT 开口三角侧均有几伏甚至十几伏的 50 Hz 的不平衡电压, 这个干扰电压与被测量信号叠加在一起给测量结果造成很大影响, 因此在测量时必须采取滤波技术和陷波电路将工频信号消除, 保证注入信号的准确测量<sup>[13]</sup>。

## 参考文献

- [1] 要焕年. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.  
YAO Huan-nian. Resonant grounding power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 邵霞, 周有庆, 彭红海. 一种改进的直测电容电流型

电子式电压互感器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 240-247.

SHAO Xia, ZHOU You-qing, PENG Hong-hai. An improved electronic voltage transformer based on direct detecting capacitor current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 240-247.

- [3] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.  
SU Ji-feng. Research of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 141-148.
- [4] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 146-152.  
GUO Qing-tao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 146-152.
- [5] 陈忠仁, 周程宏, 王妍. 配电网电容电流谐振测量方法的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 128-130.  
CHEN Zhong-ren, ZHOU Cheng-hong, WANG Yan. Application of resonance measurement method for capacitive current of the distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 128-130.
- [6] 刘毅敏, 高广峰. 电网电容电流的最小二乘法辨识算

- 法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 49-52.  
LIU Yi-min, GAO Guang-feng. Least square identification algorithm of capacitive current in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 49-52.
- [7] 刘力, 孙结中. 一种测量配电网电容电流的新方法[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 63-65.  
LIU Li, SUN Jie-zhong. A new method to measure capacitance current in distribution network[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 63-65.
- [8] 程玉凯, 杜文凤. 基于双信号注入法的配电网电容电流测量[J]. 电测与仪表, 2012, 49(557): 21-24.  
CHENG Yu-kai, DU Wen-fang. Measurement for capacitance current in distribution network based on double signal injection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(557): 21-24.
- [9] 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, 2004, 17(6): 25-28.  
ZHAO Zheng-jun, JIANG Xin-yu. Research on capacitive current measurement with signal injection in distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2004, 17(6): 25-28.
- [10] 曾祥君, 易文韬, 刘张磊, 等. 注入信号精确谐振测量配电网电容电流新技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 77-80.  
ZENG Xiang-jun, YI Wen-tao, LIU Zhang-lei, et al. Injected signal accurate measurements resonant capacitance current distribution network new technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 77-80.
- [11] 田建设, 韦良, 李天旭. 基于改进信号注入法的配电网电容电流测量[J]. 广东电力, 2008, 21(7): 28-31.  
TIAN Jian-she, WEI Liang, LI Tian-xu. Measurement of capacitance current in distribution network based on improved signal injecting method[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21(7): 28-31.
- [12] 孙岩洲, 邱毓昌. 配电网电容电流的测量方法分析[J]. 高压电器, 2002, 38(5): 27-29.  
SUN Yan-zhou, QIU Yu-chang. Measurement of capacitive current in power distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(5): 27-29.
- [13] 董涛, 夏小飞, 刘铁, 等. 外加信号法测量配电网电容电流[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 38-40.  
DONG Tao, XIA Xiao-fei, LIU Tie, et al. Plus signal to measure capacitive current distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 38-40.

---

收稿日期: 2014-01-06; 修回日期: 2014-03-29

作者简介:

宋晓燕(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: sxywin2012@163.com

孙岩洲(1972-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事高电压技术和气体放电等方面的研究;

宋紫嫣(1987-), 女, 本科, 从事电力方面的工作。