

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.024

非有效接地电力系统对地电容电流的测试方法的研究

姜楠, 李随朝

(西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077)

摘要: 为了解决 6~35 kV 非有效接地电力系统对地电容电流的精确测量问题, 文中介绍了一种利用配电网电容电流测试仪在三相电压互感器开口三角处通过异频法进行测量, 将测量的两次数据 (PT 空载和 PT 带线路负载) 进行差值计算的方法, 从而来确定 6~35 kV 非有效接地电力系统的电容电流。通过对电厂 6~35 kV 配电网的 19 条线路进行在线测量, 并对试验数据进行分析、试验方法进行验证以及对部分线路进行改造, 改造后的结果证明了该方法的可行性和准确性。

关键词: 非有效接地; 电力系统; 电容电流; 三相电压互感器

Testing Method for Capacitance Current of Insufficiently Grounded Power System to Ground

JIANG Nan, LI Suichao

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: For accurate test of the capacitance current of 6~35 kV insufficiently grounded power system to ground, a testing method was proposed, in which a capacitance current tester of distribution network is used for the test by means of the different-frequency method at open delta of a three-phase voltage transformer, and the difference of measured data of PT with load on line and without load is calculated to determine the capacitance current of the 6~35 kV insufficiently grounded power system to ground. On-line test was conducted on 19 lines of the 6~35 kV distribution network in a power plant, the test data were analyzed to verify the correctness of the proposed testing method. Part of the lines were modified according to the data, and the result demonstrate the feasibility and accuracy of the proposed method.

Key words: insufficient grounding; power system; capacitance current; three-phase voltage transformer

0 引言

目前, 国内现有的 6~35 kV 中压电网普遍还是中性点不接地的系统, 随着供电网络的发展, 特别是电缆线路日益增加, 使得系统单相接地电容电流不断增加, 导致电网在单相接地故障时, 电容电流过大, 产生很高的过电压, 无法自动灭弧^[1-2]。因此, 中国的电力规程规定当 10 kV 和 35 kV 系统电容电流分别大于 30 A 和 10 A 时, 应装设消弧线圈以补偿电容电流^[3], 这就要求对配电网的电容电流进行测量。

对地电容电流的测量方法可以分为估算法、直接法和间接法^[4]。估算法是根据不同的电网, 通过经

验公式推算出电容电流的大小。由于电网上影响电容电流大小的因素很多, 而且是动态变化的, 因此该方法计算出的电容电流值精度较差; 直接法又包括单相金属接地法、外加电容间接测量法等^[5], 通过人为的使线路单相接地, 从而来测得电容电流, 这些方法都需要接触到一次设备, 而且可能对非接地相绝缘造成两相异地短路, 因而该方法存在试验危险, 操作繁杂, 工作效率低等缺点; 间接法无需人工金属接地, 只需接入某些元件或注入特定的测量信号进行测量, 获取数据, 然后再做解析计算的一种测量方法^[6]。该方法在测试时不需要与一次侧打交道, 因而该方法更简单、更安全。在间接测试方法中, 可按测量时的电流频率分为工频注入法和异频注入法, 由于异频注入法是从 PT 开口三角处注入

微弱的异频测试信号,所以既不会对继电保护和 PT 本身产生影响,又避开了 50 Hz 的工频干扰信号,测量数据的准确度更高。

为此,笔者针对非有效接地电力系统对地电容电流,研究了间接法中的异频注入法及存在的问题,并提出新的测试方法,通过对实际电网线路进行测试和验证,证明了该方法的可靠性和准确性。

1 异频注入法

异频注入法是在电压互感器的二次侧注入小电流的异频信号,通过高性能的 A/D 采样回路和数字信号处理器,对测得的数据进行计算分析,从而得到电容电流。考虑到测量的安全性,采用小电流的异频注入,测量信号的有效值小于 1 V。

1.1 异频注入法的测试原理

异频测试信号通过配电系统中的三相电压互感器 PT 开口三角处向电力系统的零序网络注入,从而测量配电网的电容电流,其测量原理线路见图 1。

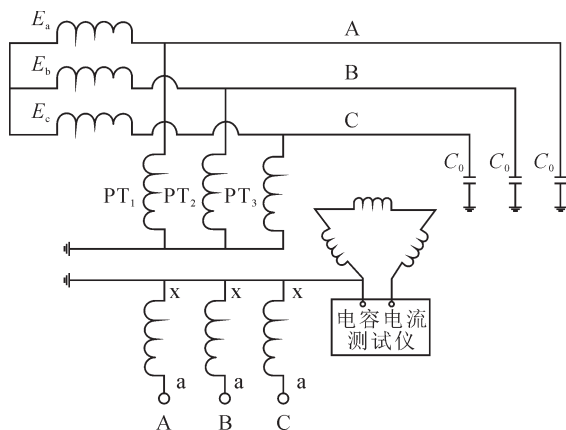


图 1 测量原理线路图

Fig. 1 The measuring principle route map

在图 1 中,从 PT 开口三角注入一个异频的电流 I_1 ,这样在 PT 高压侧就可以感应出一个按变比减少的电流 I ,此电流为零序电流,即其在三相的大小和方向相同,因此它在电源和负荷侧均不能流通,只能通过 PT 和对地电容 $3C_0$ 形成回路,这个电流 I 将分别在 PT 三相绕组的电阻 R 、漏抗 X_L 和导线对地电容中产生压降,这样就可以依据电容与阻抗的关系准确地计算出系统的电容电流,所以图 1 又可以简化为图 2。

根据图 2 的物理模型就可建立相应的数学模型,通过检测测量信号就可以测量出三相对地电容值 $3C_0$,再根据式(1)计算出配电网系统的电容电流(式(1)中: I 为电容电流; ω 为角频率, $\omega=2\pi f=314$; U_ϕ 为被测系统的相电压)。

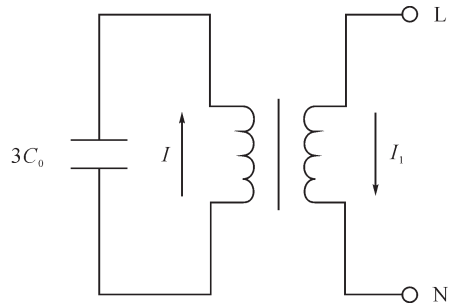


图 2 简化物理模型

Fig. 2 Simplified physical model

$$I=3\omega C_0 U_\phi. \quad (1)$$

1.2 异频注入法的误差分析

异频测试信号对电力系统网络对地电容电流进行测量前,应对测试仪进行校准测量。校准方法采用标准件法,用已知的标准电容,让测试仪来测量,计算测量结果与标准值的偏差是否满足要求。选取三组电容值,分别用异频注入法进行测试,其结果见表 1。

表 1 校准测试仪的测量结果

Table 1 Measurement of calibration tester

测量参数	1/2×470 μF	470 μF	2×470 μF
电容电流 I/mA	130	260	528
电容量 $3C_0/\mu\text{F}$	0.072	0.143	0.291
标称电容量 $C_B/\mu\text{F}$	0.070 5	0.141 0	0.282 0
测量误差 $\varepsilon/\%$	2.13	1.42	3.19
相量角 $\varphi/(^\circ)$	89.17	88.92	89.71

进行此试验时,测试仪的档位选择为:相电压 $10/\sqrt{3}$ kV,PT 变比 57.735(即 $10/\sqrt{3}$ kV/100 V),在表 1 中标称电容量 C_B 按式(2)计算。

$$C_B=C_D/K^2. \quad (2)$$

式(2)中: C_D 为被测电容, K 为 PT 变比。由表 1 的测量结果可以看出,测量的相量角 φ 约为 89° ,说明测量电流超前于电压,为容性电流,且测量误差最大为 3.19%,而测试选择的电容允许误差为 $\pm 5\%$,所以,测量结果满足要求,异频注入法的测量结果准确、可靠。

1.3 异频注入法在实际测试中的问题

贵州水钢水电厂第 6 号变电站 10 kV II 段线路进行试验时,异频注入法测得的数据见表 2。

表 2 第 6 号变电站 10 kV II 段测试数据

Table 2 Test data of No. 6 substation 10 kV II segment

PT 状态	电容量 $3C_0/\mu\text{F}$	电容电流 I_c/A	相量角 $\varphi/(^\circ)$
PT 空载	3.71	6.73	-68.05
PT 带线路负载	2.04	3.70	51.15

从表 2 的测量数据可以看出,PT 空载线路未投

的状态下,电容量理论上应为零,但测得的电容量为 $3.71 \mu\text{F}$, 电容电流为 6.73 A ;PT 带线路负载本应有较大的电容量,却测得电容量为 $2.04 \mu\text{F}$, 电容电流为 3.70 A ,比空载状态还要小。然而从表 2 相量角可以看出,PT 空载时测得相量角 $\varphi=-68.05^\circ$,电流滞后于电压呈感性,PT 带线路负载时测得相量角 $\varphi=51.15^\circ$,电流超前于电压,为容性电流,这说明 PT 非理想 PT,它是由于励磁电流的存在,会带来较大的测量误差。

2 现场试验

根据 1.3 中存在的问题,通过异频注入法直接测量的电容电流来确定配电网对地电容电流是不准确的。根据电路的分析和现场试验,将独立的进行两次测量的数据(PT 空载和 PT 带线路负载)进行差值计算,从而来精确计算出配电网对地电容电流。

2.1 电容电流差值测试原理

图 2 的简化物理模型图可以等效为图 3 的等值电路图, Z_0 为 PT 的励磁阻抗,励磁电流在其上产生的电压降即为感应电势,可向线路提供电压源, $3C_0$ 为配电网的三相对地电容的总和。从 PT 开口三角处注入的电流 I_s 被分流成配电网的对地电容电流 I_c 和 PT 的励磁电流 I_0 。图 3 中: Z_2 为 PT 的二次侧开口三角处的等值漏阻抗(包括二次绕组电阻和漏电抗),它相对于 Z_0 及 $3C_0$ 的阻值均较小,其产生的电压降可忽略不计; Z_1 为 PT 的一次侧的等值漏阻抗(包括一次绕组电阻和漏电抗),相对于 Z_0 及 $3C_0$ 的阻值较小,其产生的电压降也可忽略不计。

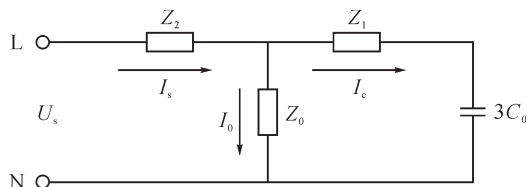


图 3 简化的测量线路等值电路图

Fig. 3 Simplified equivalent circuit diagram of the measurement circuit

通过图 3 原理进行现场测量试验时,首先进行 PT 空载测试。在试验中,由于线路未投入测试回路,图 3 中三相对地电容 $3C_0$ 是断开的,因而 $I_c=0$,故电容电流测试仪检测到的励磁电流 I_0 呈感性。在表 2 的 PT 空载测试数据中,相量角 $\varphi=-68.05^\circ$ 证明了电流滞后于电压呈感性,所以测试仪显示的是的电容值实际是一个等效的电感值;第 2 步进行 PT 带线路负载测试。在试验中,由于线路接入测试回路,所以就存在三相对地电容 $3C_0$,故电容电流测试仪检测

到的是励磁电流 I_0 和配电网三相对地电容电流 I_c 的合成电流。由于感性电流 I_0 和容性电流 I_c 方向相反,所以合成电流会变小,在表 2 的 PT 带线路负载中,相量角 $\varphi=51.15^\circ$ 证明了电流超前于电压呈容性,说明合成电流将感性电流 I_0 完全补偿掉,成为容性电流。从图 3 可以看出,第 2 次测量比第 1 次测量只是增加了一个对地电容电流 I_c ,因而只要将独立的进行两次测量的数据(PT 空载和 PT 带线路负载)进行差值计算,得到变化量 ΔI_s 就可计算出配电网三相对地电容电流 I_c ,见式(3)。

$$\Delta I_s = I_{s2} - I_{s1} = I_c + I_0 - I_0 = I_c \quad (3)$$

2.2 电容电流差值测试方法

采用异频注入的测量方法,原则上可以不停电,进行在线测量,只要拆除 PT 开口三角形两端负载,将信号源电流(I_i)注入进去就可进行测量。其测试方法为:

- 1)断开系统线路负载侧开关;
- 2)断开系统电源侧开关;
- 3)进行二次回路接线,切断 PT 开口三角形两端负载,将测试仪输出端子接到 PT 开口三角两端,通过异频注入法测量电容电流 I_{s1} ;
- 4)将母线 PT 一次侧中性点直接接地;
- 5)合上系统负载侧线路开关;
- 6)合上测量仪器电源开关,通过异频注入法测量电容电流 I_{s2} ;
- 7)断开测量仪器电源开关;
- 8)断开系统负载侧线路开关;
- 9)进行接地放电;
- 10)拆除测量接线,恢复系统一、二次接线;
- 11)合上系统电源侧开关;
- 12)合上系统负载侧线路开关,恢复正常供电;
- 13)通过差值计算得出配电网三相对地电容电流 I_c 。

2.3 在电力系统中的实际测试结果及分析:

对电力系统中水钢水电厂 6~35 kV 配电网中的六段线路进行了实际测试,测试分两部分:第 1 部分是使用测试仪的异频注入法进行两次测量,将测量的两次数据(PT 空载和 PT 带线路负载)进行差值计算,从而来计算出配电网对地电容电流,此方法不需要与一次侧直接打交道;第 2 部分是通过中性点外加电容法测得线路总电容,然后通过式(1)可以求得该线路的电容电流,此方法需要与一次侧直接打交道,测试数据见表 3。

从表 3 可以看出:通过对 6 组线路的测试比对,电容电流差值法在测试配电网线路的电容电流

表3 电容电流测试数据

Table 3 Test data of capacitance current

测试项目	中央变	中央变	铁前变	铁前变	第6号变	第6号变
	35 kV (1 段)	35 kV (2 段)	10 kV(1 段)	10 kV(2 段)	10 kV (1 段)	10 kV (2 段)
电容电流(差值法)/A	10.93	24.02	9.62	22.65	8.71	10.40
电容电流(外加电容法)/A	10.69	23.56	9.35	22.13	8.59	10.10
误差/%	2.25	1.95	2.89	2.35	1.40	2.97

的最大误差为 2.97%, 误差小于 $\pm 5\%$, 满足测试要求。然而中性点外加电容法测试时与一次侧打交道, 试验人员安全得不到保障; 由于操作时涉及一次设备, 操作繁琐, 准备工作耗时长, 工作效率低。水电厂可以根据表 3 的测试数据, 当 10 kV 和 35 kV 系统电容电流分别大于 30 A 和 10 A 时, 需在配电网中性点加装消弧线圈, 从而减小单相短路时的短路电流。加装消弧线圈后, 配电网系统可能会处于不稳定状态, 所以同时还需加装消谐装置。

2.4 测试注意事项

1) 检查配电网是否安装有消弧线圈, 在被测电压等级的相关系统中所有消弧线圈均要退出运行;

2) 断开母线 PT 开口三角端子与其他设备的连接, 如开口三角连接的各消谐装置(可控硅式、压敏电阻式消谐器除外), 电压继电器等;

3) 在测量中, 如系统有 3PT 的接线方式, 应尽量从 3PT 中测量, 尽量避免采用 4PT 接线方式。如果只有 4PT 接线方式, 应该先将 4PT 接线方式改为 3PT 接线方式后, 再进行测量;

4) 对于母线 PT 一次侧中性点经消谐器、消谐管接地的系统, 测量结果与实际值偏差很大, 还应将母线 PT 一次侧中性点直接接地;

5) 对于母线 PT 一次侧中性点串联单相 PT 接地的系统, 还应将母线 PT 一次侧中性点直接接地;

6) 雪、雨、雾时不宜使用, 因系统对地的漏电流较大而不能保证测量结果的正确性。

3 结语

文中提出了一种测量非有效接地配电网对地电容电流的新方法。通过异频注入法直接测得非有效接地配电网的对地电容电流 I_c , 然后再采用电容电流差值法将两次测量的数据 (PT 空载和 PT 带线路负载) 进行分析计算, 从而计算出电容电流。该方

法消除了异频注入法测试配电线路时存在的问题, 准确地测量出配电网对地电容电流, 通过验证试验, 证明该方法的误差小于 3%, 满足电力系统现场运行要求, 从而有效地解决了 10/35 kV 非有效接地配电网的电容电流测量和整改的问题。

参考文献:

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [3] 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 Jiezhong. A new method to measure capacitance current in distribution network [J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 63-65.
- [4] 张科峻, 张文平, 姚毅. 10~35 kV 不接地系统电容电流测试方法研究[J]. 电力系统及其自动化, 2014, 36(2): 63-65.
ZHANG Kejun, ZHANG Wenping, YAO Yi. A discussion on the method for testing the capacitive current of the 10~35 kV ungrounded system[J]. Power System&Automation, 2014, 36(2): 63-65.
- [5] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [6] 芦冬坤, 柴新. 对地电容电流测试原理及方案[J]. 电气开关, 2012, 6(6): 104-106.
LU Dongkun, CHAI Xin. Measuring principle and plan of earth capacitance current[J]. Electric Switcher, 2012, 6(6): 104-106.

姜楠(1983—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究互感器、电磁兼容试验、智能高压电器试验方法等。

李随朝(1957—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究精密互感器的研制及检测标准等。