

基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量方法

吴丽芳¹, 白浩², 欧阳健娜¹, 袁智勇², 李珊¹

(1.广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西南宁 530023; 2.南方电网科学研究院有限责任公司, 广东广州 510663)

摘要:传统配电网对地电容测量方法受中性点接地方式的影响较大,且无法消除消谐电阻和电压互感器内阻抗对测量精度的影响。为此,提出一种不受中性点接地方式影响的配电网对地电容精确测量方法,利用配电网外接特制的带有分接抽头的 Y/ Δ 接线接地变压器,通过调节接地变压器高压侧绕组接地抽头到较低档位来确保配电网零序电压在规定偏移值内变化,并通过测量得到所需零序电压和零序电流,得到系统对地电容;并在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中对所提的对地电容测量方法进行仿真分析,分析结果表明:该方法测量精度高,且对地电容电流测量过程具有安全、简便、经济的特点。

关键词:配电网;对地电容测量;接地变压器;分接抽头

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.05.012 中图分类号:TM76 文章编号:1673-9140(2022)05-0109-06

Accurate measurement method of distribution network-to-ground capacitance based on graded adjustment of grounding transformer windings

WU Lifang¹, BAI Hao², OUYANG Jianna¹, YUAN Zhiyong², LI Shan¹

(1.Electric Power Science Research Institute, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China;
2.Electric Power Science Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The traditional measurement method of distribution network grounding capacitance is greatly affected by the neutral grounding mode, and cannot eliminate the influence of harmonic elimination resistance and internal impedance of voltage transformer on the measurement accuracy. For this reason, an accurate measurement method of distribution network grounding capacitance that is not affected by the neutral point grounding mode is proposed. By using the Y/ Δ connection grounding transformer with tap connected externally to the distribution network, the zero sequence voltage of the distribution network is ensured to change within the specified offset value by adjusting the grounding tap of the high voltage side winding of the grounding transformer to a lower gear, and the required zero sequence voltage and current are measured to obtain the system grounding capacitance. The proposed method is simulated and analyzed in PSCAD/EMTDC simulation environment. The analysis results show that the method has high measurement accuracy, and the measurement process of grounding capacitance is safe, simple and economical.

Key words: distribution networks; ground capacitance measurement; grounding transformer; tap

收稿日期:2021-05-16;修回日期:2021-09-11

基金项目:广西电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20190061)

通信作者:吴丽芳(1984—),女,硕士,高级工程师,主要从事配网自动化、电力电子研究;E-mail:wu_lf@gx.csg.cn

中国 110 kV 及以上高压电网一般采用中性点直接接地方式,而在中低压配电网中为保证供电可靠性,一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地方式^[1]。随着社会经济的不断发展,配电网规模逐渐增大,特别是电缆线路被大量投入使用,导致配电网对地电容增长较大,对地电容电流随之增大。当配电网发生单相接地故障时,若配电网对地电容电流大于 10 A,容易导致电弧在电压过零点熄灭后重燃,严重时甚至会破坏相间绝缘,造成更加严重的后果。所以当配电网对地电容电流达到一定数值时,应采用中性点经消弧线圈接地来补偿对地电容电流^[2-5]。因此,配电网对地电容的精准测量不仅是确定配电网中性线接地方式的前提,也是确定消弧线圈补偿容量的依据^[6-7]。

目前,配电网对地电容的测量方法可分为两类。第 1 类为需要接触一次设备的测量方法,如单相金属接地直接测量法,外加电容间接测量法等。单相金属接地直接测量法通过人工投入接地开关,测量出故障残余电流和消弧线圈补偿电流来计算出对地电容电流,从而计算出对地电容。中性点外加电容法通过在中性点外加电容接地,测量电网的不对称电压和中性点电压来计算对地电容^[8-9]。此类测量方法需直接接触一次设备,存在试验危险、操作繁杂,测量过程对电力系统正常运行影响较大等缺点。

配电网对地电容测量第 2 类方法为无需接触一次设备的测量方法,如扫频法、二频法、三频法等^[10]。文献[11]提出了一种基于二次扫频法的配电网对地电容测量的方法,此方法虽然缩短了扫频法的扫频范围,但同样受扫频精度的影响,同时测量过程中发生接地故障,引起消弧线圈调档,可能会造成谐振过电压过高而烧坏消弧线圈。文献[12]提出了一种中性点注入 3 个不同频率的电网电容电流测量方法,虽然该方法克服了三频法受电压互感器漏抗影响以及测量范围小的缺点,但该方法的计算过程依旧和常规三频法一样较为复杂,选取注入信号的频率也会影响其测量精度^[13]。文献[14]提出一种基于双电压互感器的对地参数测量方法,通过在配电线路一端的电压互感器二次侧开口三角形注入一特征信号,在线路另一侧电压互感

器二次侧开口三角形接收该特征信号,使得该注入信号直接作用于对地参数支路,消除了消谐电阻以及电压互感器内阻抗对测量过程的影响,但该测量方法只适用于中性点不接地系统。

为消除第 1 类测量方法过程中试验危险、操作繁杂,测量过程对电力系统正常运行影响较大等缺点,以及第 2 类测量方法中消谐电阻、电压互感器内阻抗对测量的影响和测量不受配电网接地方式的影响。本文提出一种基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量方法,该方法不需要增加额外的测量设备,通过调节接地变压器系统侧绕组的分接抽头接地来改变系统的零序电压,通过测量得到所需的零序电压和零序电流来计算出配电网对地电容,同时能确保测量过程中产生的零序电压不会对系统造成冲击。

1 配电网对地电容精确测量方法

1.1 对地电容精确测量方法原理

基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量方法原理如图 1 所示,其中 \dot{E}_A 、 \dot{E}_B 、 \dot{E}_C 分别为非直接接地配电网三相电源电势, C_A 、 C_B 、 C_C 为非直接接地配电网对地电容, r_A 、 r_B 、 r_C 为非直接接地配电网对地泄漏电阻,非直接接地配电网经 Y/△接线的接地变压器引出中性点 O。开关 S_0 闭合时,表示配电网中性点经阻抗 Z_0 接地。当 $Z_1=R$ 时,表示配电网中性点经小电阻接地;当 $Z_1=R+j\omega L$ 时,表示配电网中性点经消弧线圈串电阻接地。开关 S_0 断开表示配电网中性点为不接地方式。 A_H 、 B_H 、 C_H 为 Y/△接线接地变压器高压侧绕组,接地变压器高压侧绕组的首端直接与非直接接地配电网三相线路连接,接地变压器高压侧各相绕组不同位置设置分接抽头^[15], S_A 、 S_B 、 S_C 为 3 个真空断路器,各相绕组分接抽头可通过引出线引接到三相接地开关 S_A 、 S_B 、 S_C 上。其中,分接抽头引出线流过的电流为 I_s ,将其中的某个真空断路器的线圈与另外 2 个真空断路器的常闭触点串接可实现闭锁保护,保证任意调节某一相分接抽头接地时不会出现接地变压器系统绕组两点接地。在接地变压器系统侧绕组均匀设置多个分接抽头,每相绕

组线圈总匝数为 N ,每相绕组的分接抽头数量为 n 。每相分接抽头档位编号 X 从系统中性点至馈线出口依次递增,分别为 $1、2、\dots、n$,各分接抽头到中性点的线圈匝数 N_x 依次为 $N_1、N_2、\dots、N_n$ 。 $a_\Delta、b_\Delta、c_\Delta$ 为接地变压器低压侧绕组。

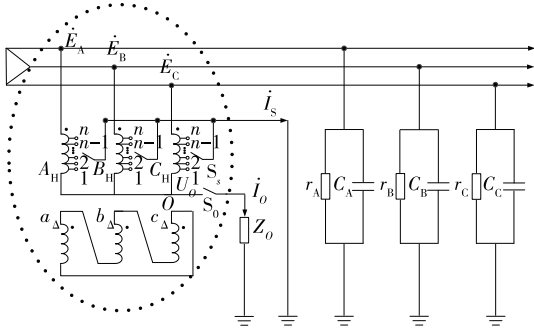


图 1 基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量原理

Figure 1 Accurate measurement principle of distribution network-to-ground capacitance based on graded adjustment of grounding transformer windings

当接地变压器高压侧某相绕组对应的分接抽头接地时,增加分接抽头的档位,能够使得中性点电压 \dot{U}_0 幅值随接地档位增加而增大^[15]。在进行对地电容测量时,中性点位移电压应不超过电力系统运行规程的最大偏移值,确保在对地电容测量过程中不会对电气设备以及电力系统的安全稳定运行带来影响^[16],所以在测量对地电容电流时应选择接地变压器较低档位分接抽头接地。

如图 1 所示,由基尔霍夫电流定律可得对虚线包围的闭合曲面列 KCL 方程,有

$$-(\dot{I}_0 + \dot{I}_s) = (\dot{E}_A + \dot{U}_0) \left(\frac{1}{r_A} + j\omega C_A \right) + (\dot{E}_B + \dot{U}_0) \left(\frac{1}{r_B} + j\omega C_B \right) + (\dot{E}_C + \dot{U}_0) \left(\frac{1}{r_C} + j\omega C_C \right) \quad (1)$$

忽略配电网三相对地参数不对称的影响,则有 $C_A = C_B = C_C = C_0, r_A = r_B = r_C = r_0$,带入式(1)得:

$$-(\dot{I}_0 + \dot{I}_s) = (\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C) \left(\frac{3}{r_0} + j3\omega C_0 \right) + \dot{U}_0 \left(\frac{3}{r_0} + j3\omega C_0 \right) \quad (2)$$

由配电网三相电源电势对称,则有

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0 \quad (3)$$

带入式(2)得:

$$-(\dot{I}_0 + \dot{I}_s) = \dot{U}_0 \left(\frac{3}{r_0} + j3\omega C_0 \right) \quad (4)$$

则有

$$C_s = 3C_0 = \frac{1}{2\pi f} \text{Im} \frac{-(\dot{I}_0 + \dot{I}_s)}{\dot{U}_0} \quad (5)$$

式中 C_s 为非直接接地配电网三相对地总电容。

对地电容电流为

$$I_C = |\dot{U}_\varphi \cdot j\omega C_s| = \omega C_s U_\varphi \quad (6)$$

式中 \dot{U}_φ 为非直接接地配电网相电压; f 为配电网频率。

1.2 测量方法的实现流程

基于接地变压器分级调节的非直接接地配电网对地电容测量技术流程如图 2 所示,首先调节接地变压器系统侧绕组分接抽头的最小档位接地,从开口三角电压互感器测量规算到一次侧的零序电压值 \dot{U}_0 ,从零序电流互感器测量规算到一次侧的零序电流值 \dot{I}_0 以及高压侧绕组抽头接地线上的零序电流 \dot{I}_s ;然后利用式(5)即可实现配电网对地电容的精确测量,同时可得到配电网对地泄露电阻及泄露电流的精确测量。该测量方法通过配电网接地变压器系统侧分接抽头的最小档位接地,产生较小的零序电压,规避了零序电压过大对系统造成冲击和保护误动的风险,不影响配电网正常运行,测量过程安全可靠。

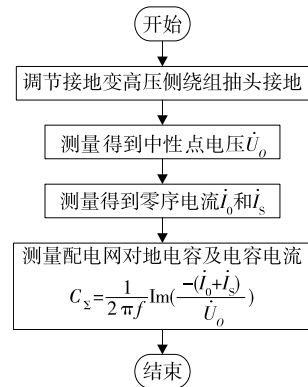


图 2 基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量流程

Figure 2 Accurate measurement process of distribution network-to-ground capacitance based on graded adjustment of grounding transformer windings

2 仿真分析

为验证本文所提出的基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量方法的准确性,在PSCAD/EMTDC仿真环境中搭建如图3所示的10 kV配电网模型进行仿真分析。

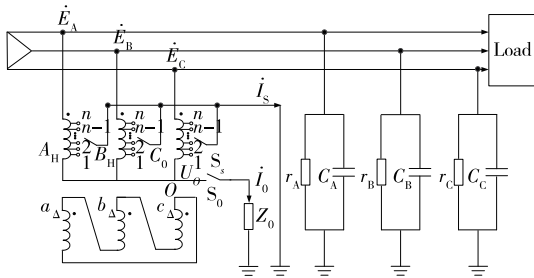


图3 基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量仿真

Figure 3 Simulation of accurate measurement of ground capacitance of distribution network based on graded adjustment of grounding transformer windings

不同线路的对地电容值从小到大依次为架空线路、混合线路和电缆线路,改变仿真模型中输电线路的对地参数,即相当于测量不同的线路类型的对地电容及对地电容电流值。

打开开关 S_0 ,表示中性点不接地系统,调节接地变压器A相高压侧绕组 A_1 抽头接地,此时 $\dot{I}_0 = 0$ A。改变配电网三相对地参数,由测量得到的中性点电压 \dot{U}_0 以及高压侧抽头接地线上的零序电流 \dot{I}_s ,利用式(5)、(6)得到如表1所示的中性点不接地系统 A_1 档位下不同对地参数时的测量结果。

表1 中性点不接地系统 A_1 档位下不同对地参数时的测量结果

Table 1 Measurement results of different grounding parameters at A_1 gear of the neutral point ungrounded system

组别	对地电容值/ μF		相对误差/ %
	实际值	测量值	
1	2.800	2.798	0.071
2	5.700	5.703	0.053
3	10.000	10.004	0.040
4	18.000	18.031	0.072
5	25.000	25.035	0.140

由表1可知,对于中性点不接地系统中不同类型的输电线路,测量得到的对地电容结果误差满足测量精度的要求。

其中,当 $C = 2.8 \mu\text{F}$ 时的中性点电压 U_0 、接地变抽头接地线零序电流 I_s 以及对地电容测量变化情况如图4~6所示。

闭合开关 S_0 ,表示中性点经消弧线圈接地系统。调节接地变压器A相高压侧绕组 A_1 抽头接

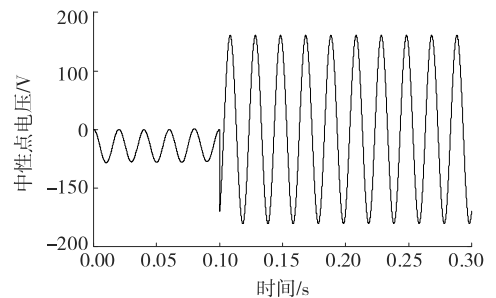


图4 中性点不接地系统零序电压波形

Figure 4 Zero-sequence voltage waveform of neutral point ungrounded system

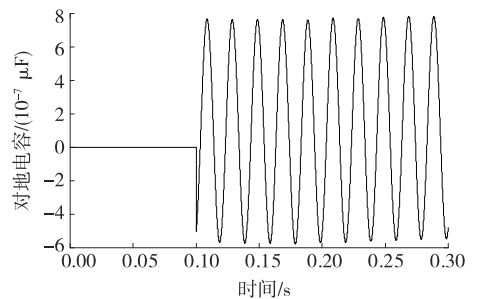


图5 中性点不接地系统接地变抽头接地线零序电流波形

Figure 5 Zero-sequence current waveform of the grounding wire of the grounding transformer tap of the neutral point ungrounded system

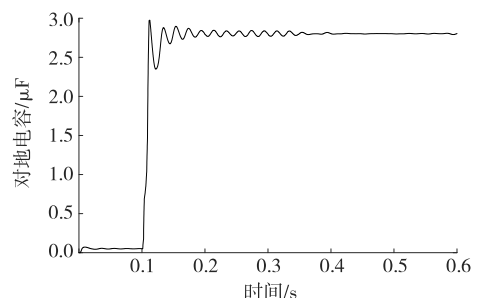


图6 中性点不接地系统测量电容变化波形

Figure 6 Measurement of capacitance variation for neutral point ungrounded system

地,改变配电网三相对地参数,由测量得到的中性点电压 \dot{U}_O 以及零序电流 \dot{I}_O 和 \dot{I}_S ,利用式(5)、(6)得到如表 2 所示的中性点经消弧线圈接地系统 A_1 档位下不同对地参数时的测量结果。

表 2 中性点经消弧线圈接地系统 A_1 档位下不同对地参数时的测量结果

Table 1 Measurement results of different grounding parameters at A_1 gear of the neutral grounding via arc suppression coil system

组别	对地电容值/ μF		相对误差/ %
	实际值	测量值	
1	2.800	2.798	0.011
2	5.700	5.696	0.070
3	10.000	10.006	0.060
4	18.000	17.992	0.044
5	25.000	24.999	0.004

由表 2 可知,对于中性点经消弧线圈接地系统中不同类型的输电线路,测量得到的对地电容结果误差同样满足测量精度的要求。

其中,当 $C=25 \mu\text{F}$ 时,对地电容测量变化情况如图 7 所示。

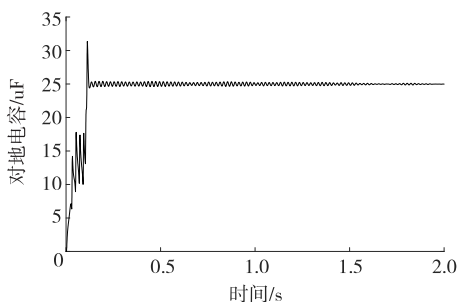


图 7 中性点经消弧线圈接地系统测量电容变化波形

Figure 7 Measurement of capacitance change waveform for neutral grounding via arc suppression coil system

对于测量过程中电容值出现震荡的情况,可选取波动较小的测量值或取震荡周波的均值作为测量结果,则能得到对地电容的精确测量结果。

3 结语

针对传统的配电网对地电容测量方法无法消除测量过程中阻尼电阻和电压互感器短路阻抗的影响,以及传统的配电网对地电容测量方法受系统

接地方式的影响较大,提出了基于接地变压器绕组分级调节的配电网对地电容精确测量方法。利用配电网外接的特制的带有分接抽头 Y/ Δ 接线的接地变压器,通过让接地变压器一相高压侧绕组抽头接地,改变配电网零序电压并测量得到所需的零序电压和零序电流,从而得到配电网的对地电容。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中分析验证了所提方法在中性点非直接接地方式下均能有效、精确测量出配电网对地电容,适用性更为广泛。并且该方法通过变压器分接抽头接地产生的零序电压,未超过电力系统运行规程的允许范围,不会给电力设备以及系统安全稳定运行带来潜在威胁。

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,2009:34-36.
- [2] 陈子辉,麦荣焕,倪惠浩,等.计及电能质量因素的变压器能效分析[J].供用电,2020,37(5):64-72.
CHEN Zihui, MAI Ronghuan, NI Huihao, et al. Energy efficiency analysis of transformers considering power quality factors[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(5):64-72.
- [3] 谭振龙,钱相宜,蔡文畅.配置高抗站的海上风电长距离海缆送出继电保护分析[J].中国电力,2021,54(8):175-181.
TAN Zhenlong, QIAN Xiangyi, CAI Wenchang. Analysis of relay protection for offshore wind power long-distance submarine cable transmission with high resistance station[J]. Electric Power, 2021, 54(8):175-181.
- [4] 代双寅,刘书铭,赵麒哲,李琼林.基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):141-147.
DAI Shuangyin, LIU Shuming, ZHAO Qizhe, et al. A harmonic voltage measurement method based on CVT capacitor current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20):141-147.
- [5] 张姗,梁志瑞,张丽芳,等.一种谐振接地系统电容电流测量新方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):109-114.
ZHANG Shan, LIANG Zhirui, ZHANG Lifang, et al. A new capacitor current measurement method for resonance grounding system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1):109-114.

- [6] 盛能进,张文嘉,彭竹弈,等.改善关键线路潮流问题的可控串联补偿装置研究[J].高压电器,2020,56(1):148-154.
SHENG Nengjin, ZHANG Wenjia, PENG Zhuyi, et al. Research on the controllable series compensation device to improve the power flow problem of key transmission Lines[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 148-154.
- [7] 黎新吉,张平,陈博,等.中性点不接地配电网电容电流在线测量方法比较[J].电力科学与技术学报,2008,23(2):66-71.
LI Xinji, ZHANG Ping, CHEN Bo, et al. Capacitive current on-line measurement methods comparing for un-earthed distribution systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(2): 66-71.
- [8] 王必平.中压电网中性点接地方式的研究[D].青岛:中国石油大学,2010.
- [9] 王庆军,王贻平,朱胜龙,等.配电系统电容电流的测量[J].工程与建设,2016,30(2):161-162+177.
WANG Qingjun, WANG Yiping, ZHU Shenglong, et al. Measurement of capacitive current in distribution system[J]. Engineering and Construction, 2016, 30(2): 161-162+177.
- [10] 赵宪,章彪,刘海龙.配电线路电容电流测量方法比较[J].山东电力技术,2017,44(7):43-47.
ZHAO Xian, ZHANG Biao, LIU Hailong. Comparison on frequently-used methods of capacitive current measurement on power distribution lines[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(7): 43-47.
- [11] 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 Xiangjun, YI Wentao, LIU Zhanglei, et al. A novel technique of capacitive current resonance measurement with signal injected for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 77-80.
- [12] 王国友,邢亮,李伟霞,等.一种新型的电容电流在线测量系统设计[J].电测与仪表,2020,57(5):142-147.
WANG Guoyou, XING Liang, LI Weixia, et al. A novel design scheme for the online measurement system of capacitance current[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 142-147.
- [13] 周求宽,姚骏,刘衍,等.基于三频率法的配电网电容电流测量新方法[J].电测与仪表,2017,54(10):44-49.
ZHOU Qiukuan, YAO Jun, LIU Yan, et al. A new method to measure capacitance current in distribution network based on three-frequency method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(10): 44-49.
- [14] 卓超,曾祥君,喻锟,等.基于双电压互感器的中性点不接地配电网对地参数实时测量新技术[J].电网技术,2020,44(7):2657-2664.
ZHUO Chao, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A novel real-time measurement technique of grounded parameters of dual voltage transformers in neutral point un-grounded distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2657-2664.
- [15] 曾祥君,卓超,喻锟,等.基于接地变压器绕组分档调压干预的配电网主动降压消弧与保护新方法[J].中国电机工程学报,2020,40(5):1523-1534.
ZENG Xiangjun, ZHUO Chao, YU Kun, et al. A novel method of faults arc extinguishing and feeder protection based on voltage regulating intervention with grounding transformer winding taps for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1523-1534.
- [16] 李泽文,曾祥君,夏翊翔,等.高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):104-121.
LI Zewen, ZENG Xiangjun, XIA Yixiang, et al. Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2022, 19(3): 104-121.