

利用架空线路测量接地装置接地电阻的误差研究

刘 伟¹, 聂 葳², 陈 智¹, 徐 鹏¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410076; 2. 湖北超高压输电公司, 武汉 430050)

摘要: 笔者分析了利用架空线路作为电流、电压线测量接地网接地电阻的误差来源, 指出了线路的架空地线未与地绝缘是产生测量误差的根本原因。通过建立数学模型研究了变电站接地电阻值、电流回路电阻值、杆塔接地电阻值、架空地线类型的改变对接地电阻测量误差的影响; 指出接地装置对地电压测量偏差主要受架空地线的短接范围的影响。为了减小大电流法测量接地装置接地电阻的误差, 应当令测试范围内架空地线对地绝缘或采取人工放线的方式。

关键词: 大电流法; 接地电阻; 架空地线; 误差

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)08-0045-05

Error Sources of Grounding Grid Resistance Measurement Using Overhead Ground Line

LIU Wei¹, NIE Wei², CHEN Zhi¹, XU Peng¹

(1. College of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. Hubei HEV Transmission & Substation Company, Wuhan 430050, China)

Abstract: The authors analyze error sources of grounding grid resistance measurement making use of overhead ground line as current or voltage wire, and find the principal source is due to the overhead ground line uninsulated with earth. Therefore, a mathematical mode is established to investigate the effects of substation grounding resistance, current loop resistance, tower grounding resistance, and type of overhead ground line on the measurement error of grounding grid resistance. It is concluded that the ground voltage measurement error of the grounding grid is mainly affected by short range of the overhead ground line. In order to reduce the measurement error of grounding grid resistance by large-current method, overhead ground line ought to be insulated with earth within test scope or a manual wire-release way be taken.

Key words: large-current method; earth resistance; overhead ground line; error

0 引言

接地装置接地电阻是否合格对电力设备的安全工作和人身安全起着重要作用^[1-4], 根据 DL/T 475—2006《接地装置特性参数测量导则》^[5], 目前测量大型接地装置的方法主要有异频电流法^[6-7]和工频大电流法^[8-9]。工频大电流法是传统测量方法, 注入的电流大, 能渗入较深的大地中。但是测量工作量大, 人工放线不易, 正确布置测量引线是准确得到测量结果的关键^[10-13], 因此在现场测量时经常利用一条停电的架空线路作为试验用的电流和电压引线^[14]。但是利用这种方法放线时, 若架空线路的架空地线

未于地绝缘, 测量结果会产生一定误差。

笔者对利用架空线路测量接地网接地电阻的误差来源进行了分析, 并通过数学模型的建立, 仿真计算研究了各影响因素变化对接地网接地电阻的测量误差的影响。

1 问题的提出

1.1 测量实例

天荒坪抽水蓄能电站建于 1998 年, 地处高电阻率山区, 电站接地网对角线长度接近 2 km。该电站自建成起经过了 3 次接地电阻的测量, 1998 年利用 2 条 500 kV 出线作为电流线和电压线进行测量, 接地电阻测量结果为 0.905 Ω 。2000 年利用 1 条 35 kV 线路和 1 条 500 kV 线路、2005 年利用 2 条 35 kV

线路进行测量,测得的接地电阻分别为 $0.75\ \Omega$ 和 $1.14\ \Omega$ 。3次测量值之间存在一定的偏差。

根据水电站的平均土壤电阻率 $4\ 000\ \Omega\text{m}$,地网面积 $67\ 000\ \text{m}^2$,利用面积公式^[15] $R=0.5\frac{\rho}{\sqrt{S}}$ 对水电站接地电阻进行估算,其结果为 $7.72\ \Omega$,计算结果远远大于实测结果。

1.2 问题分析

这3次接地电阻测量的结果存在不真实现象,主要是由于该水电站接地电阻的3次测量都是利用已有的架空线路作为电流、电压线,同时架空线路上的架空地线未和地绝缘导致的,见图1。图1中1为待测地网,2为测试用的电压级,3为电流级,E为试验电源。

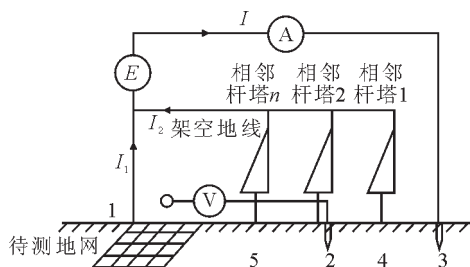


图1 考虑杆塔架空地线分流作用的接地装置测量示意图

Fig. 1 Consider the role of the tower overhead ground wire grounding shunt measurement diagram

这样的测试方式有以下问题:

1)利用已有的架空线路作为电流、电压线,测量准确的前提条件是线路的架空地线必须与地绝缘^[5]。但在实际中大部分架空地线很难与地隔离绝缘,还有部分架空地线与塔身直接相连。这样在测量时测量电流会通过架空地线形成回路,从电流级注入的部分测量电流会经杆塔架空地线分流返回即电流 I 通过杆塔1到杆塔 n 的架空地线分流,流经大地的电流减少,电流在接地网与电压测量极上形成的压降减小;同时还由于1点到2点内杆塔架空地线的短接作用,使接地网与电压测量极上的压降进一步减小,这两个因素共同使电压测量值减小。从而令计算的接地电阻值小于实际值。

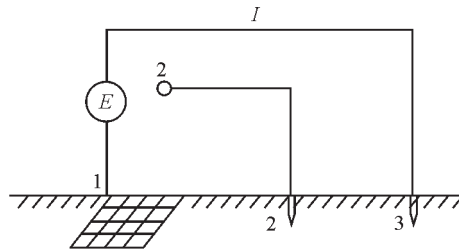
2)由于架空地线的分流作用,变电站附近架空地线,架空地线的分流在接地网附近通过变电站架空地线入地,使得实际流经接地装置的电流 I_1 小于电流测量值 I ,造成接地电阻测量值小于实际值。

2 利用架空线路测量接地装置接地电阻的测量误差来源和模型建立

2.1 误差来源

采用工频大电流法测量接地装置接地电阻时,

无论是三级法还是四级法,都需要放电流测试线和电压测试线。三级法测量接地电阻的原理接线图见图2。



1—被测接地装置;2—测量用电压极;3—测量用电流极。

图2 三极法测量工频接地电阻的原理接线图

Fig. 2 Three-pole ground resistance measurement principle of frequency wiring diagram

则接地装置的接地电阻值为

$$R_g = \frac{U}{I} \quad (1)$$

四级法测量过程中加入了辅助电极4,测量接地装置1、电压级2、电流级3、辅助级4之间的电压 U_{12} 、 U_{14} 、 U_{24} ,接地装置1和电流级2之间的电流 I ,接地装置的接地电阻值^[16]为

$$R_g = \frac{U}{I} = \frac{1}{2U_{14}I} (U_{12}^2 + U_{14}^2 - U_{24}^2) \quad (2)$$

式(2)中: U 为接地装置实际对地电压; I 为流经接地装置的电流。理论上来说,应该从无穷远的零电位面测量被测接地装置的电位,但由于电流级的引入,改变了接地级的电位分布,在土壤均匀的情况下,电位级布置在 $0.618D_{13}$ 时误差为零^[17]。四级法利用辅助级消除电压测量回路和电流测量回路互感的影响,其基本测量原理不变,都是电位降法^[18-19]。

根据电位降法原理和1.2中分析,利用架空线路作为电流、电压线测量接地装置接地电阻的误差实质上来源于以下2点:①流经接地装置的电流小于测量电流,按图1所示,即式(1)、(2)中 I_1 小于 I ,使接地电阻测量值偏小;②接地装置测量对地电压小于实际对地电压,造成零电位点偏移,使式(1)、(2)中 U 偏小,同样使得接地电阻测量值偏小。

2.2 数学模型搭建

由图1和工频大电流法测量原理,若架空地线不采用逐基接地方式,则跳过与架空地线绝缘的杆塔,将被绝缘杆塔之间架空地线看成一档。建立利用架空线路测量接地装置接地电阻的初步数学模型,见图3。

图3中: E 为试验电源, V 、 Z_L 为试验回路电流线的阻抗,其值与电流回路的长度和电流线的截面大小有关; Z_g 为试验中电流接地级的接地阻抗,其值与电流级所处地的土壤电阻率和接地装置的形式

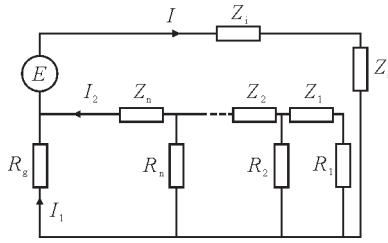


图 3 初步数学模型

Fig. 3 Preliminary mathematical model

有关, Ω ; R_g 为被测接地装置的接地电阻, Ω ; I_1 为流经接地装置的电流, A; I 为试验中测量的被测接地装置和电流级之间的电流, A; I_2 为架空地线分走的电流, A; $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ 分别为测试范围内未与地绝缘的架空地线被各基杆塔隔断的自身阻抗, Ω ; $R_1, R_2, \dots, R_n$ 分别为测试范围内架空地线未与地绝缘的杆塔的接地电阻值, Ω 。

按照图 3 所示数学模型, 架空地线的分流阻抗 Z 包括测试范围内未与地绝缘的架空地线自身阻抗和杆塔接地电阻构成的网孔。其值为

$$Z = [(Z_1 + R_1) \parallel R_2 + Z_2] \parallel R_3 \cdots + Z_n$$

架空地线的阻抗包括电阻和感抗两个部分, 为了便于计算, 下文计算中取架空地线的直流电阻进行计算。

2.3 简化数学模型

为了便于计算, 用架空地线的分流阻抗 Z 代替图 3 中架空地线自身阻抗和杆塔接地电阻构成的网孔, 可以得到简化的数学模型见图 4。

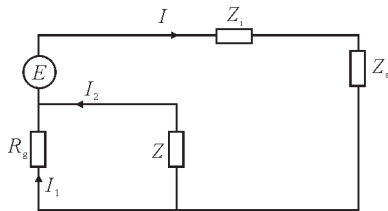


图 4 简化数学模型

Fig. 4 Simplified mathematical model

按照图 4 所示模型, 可以计算出架空地线分走的电流

$$I_2 = I \frac{Z}{Z + R_g} \quad (3)$$

同理, 计算出流经接地装置的电流

$$I_1 = I \frac{R_g}{Z + R_g} \quad (4)$$

若利用已有的架空线路作为电流、电压线测量接地装置接地电阻, 架空地线未与地绝缘的情况下, 流经接地装置的电流小于测量电流, 根据测量式(1)、(2), 测量的接地电阻值和测量误差分别为

三级法测量的接地电阻值: $R'_g = \frac{U}{I}$; 真实值为

$R_g = \frac{U}{I_1} = \frac{U}{I} \frac{Z + R_g}{R_g}$; 因此, 测量值偏小百分比为

$$\frac{R_g - R'_g}{R'_g} \times 100\% = \frac{R_g}{Z} = \frac{I}{I_2} - 1 \quad (5)$$

四级法测量的接地电阻值: $R'_g = \frac{1}{2U_{14}I} (U_{12}^2 + U_{14}^2 -$

$U_{24}^2)$; 真实值 $R'_g = \frac{1}{2U_{14}I} (U_{12}^2 + U_{14}^2 - U_{24}^2) \frac{Z + R_g}{R_g}$; 测量值偏

小百分比同样为 $\frac{R_g}{Z} = \frac{I}{I_2} - 1$ 。

3 仿真计算及分析

3.1 流经接地装置的电流测量偏差的影响

为了进一步研究图 3 中流经接地装置的电流 I_1 小于测量电流 I 对接地电阻测量的影响, 笔者采用 ATP (alternative transient program draw) 对图 3 所示模型进行仿真, 改变变电站接地电阻、电流回路电阻、杆塔接地电阻和架空地线类型, 根据式(3)、(5)研究比较出不同情况下架空地线的分流情况和接地电阻值的测量误差。试验电源使用站用变设为 380 V, 变电站接地电阻值设为 0.5 Ω , 电流回路电阻(电流线电阻 6 Ω , 电流级接地电阻 1 Ω 、变电站接地电阻 0.5 Ω)设为 7.5 Ω , 杆塔接地电阻设为 10 Ω , 架空地线采用 LGJ95/55, 杆塔间的平均档距设为 400 m。考虑到 10 基以后杆塔架空地线的分流很小, 杆塔按照 10 基计算。仿真电路见图 5。

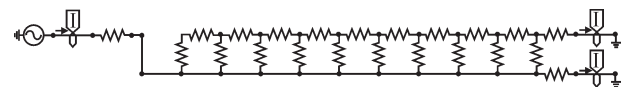


图 5 图 3 数学模型的仿真电路

Fig. 5 Fig. 3 mathematical model of the simulation circuit

3.1.1 变电站接地电阻的变化对接地电阻测量的影响

改变变电站接地电阻对接地电阻测量误差的影响情况见表 1, 架空地线的分流百分比为架空地线分走的电流 I_2 除以回路电流 I 。变电站接地电阻测量误差由式(5)得出为 $\frac{I}{I_2} - 1$ 。

当变电站接地电阻增大, 架空地线的分流情况逐渐增加, 变电站接地电阻的测量误差也逐渐增大。

3.1.2 电流回路电阻的改变对接地电阻测量的影响

这里的电流回路电阻指的是电流线电阻、电流级接地电阻和变电站接地电阻的总和。根据《接地装置特性参数测量导则》, 试验电流应达到 50 A, 在试验电源一定的情况下, 应减小回路电阻, 增大试验电流, 即尽量减小电流线的电阻并降低电流级的接地阻抗, 电流级接地电阻应通过小型接地装置或

表1 变电站接地电阻对接地电阻测量误差的影响

Tab. 1 Substation earth resistance docking earth resistance measuring error's influence

项目	参数			
变电站接地电阻/ Ω	0.3	0.4	0.5	0.6
回路电流 I/A	52.34	51.82	51.35	50.93
注入接地网的测量电流 I_1/A	45.51	43.18	41.08	39.17
架空地线的分流百分比/%	13.047 4	16.673	20	23.09
变电站接地电阻测量误差/%	15.007 7	20.009 3	25	30.023

降阻剂降到 1Ω 以下^[20]。在试验电源为 380 V 的情况下,回路电阻应控制在 8Ω 以下,才能满足电流 50 A 要求。仿真过程中保持变电站接地电阻 0.5Ω 不变,改变了电流线电阻和电流级接地电阻的总和,从而改变电流回路电阻,改变电流回路电阻对接地电阻测量误差的影响情况见表 2。

表2 电流回路电阻对接地电阻测量误差的影响

Tab. 2 Galvanic circle resistance docking earth resistance measuring error's influence

项目	参数			
电流回路电阻/ Ω	6	7	8	9
回路电流/A	59.375	51.35	45.24	40.43
注入接地网的测量电流/A	47.50	41.08	36.19	32.34
架空地线的分流百分比/%	20.008 4	20	20.006 6	20.004 9
变电站接地电阻测量误差/%	25	25	25.006 9	25.015 5

电流回路电阻的变化对架空地线的分流情况和变电站接地电阻的测量误差影响不大。但是随着电流回路电阻的增大,回路电流逐渐减小,电流回路电阻为 8Ω 时测试电流已经达不到规程要求。

3.1.3 杆塔接地电阻的改变对接地电阻测量的影响

其他条件不变,改变杆塔接地电阻对接地电阻测量误差的影响情况见表 3。

表3 杆塔接地电阻对接地电阻测量误差的影响

Tab. 3 Tower grounding resistance measurement error of the docking influence

项目	参数			
杆塔接地电阻/ Ω	10	15	20	25
回路电流/A	51.35	51.23	51.14	51.08
注入接地网的测量电流/A	41.08	42.81	43.97	44.83
架空地线的分流百分比/%	20	16.435 7	14.022 3	12.2514
变电站接地电阻测量误差/%	25	19.668 3	16.306 6	13.941 6

杆塔接地电阻越大,架空地线分流增加,变电站接地电阻的测量误差逐渐减小。

3.1.4 架空地线类型的改变对接地电阻测量的影响

改变架空地线类型对接地电阻测量误差的影响情况见表 4。

表4 架空地线类型对接地电阻测量误差的影响

Tab. 4 Overhead ground wire type docking earth resistance measuring error's influence

项目	参数		
地线类型/ Ω	LGJ95/55	LGJ120/70	LGJ240/40
回路电流/A	51.35	51.23	51.55
注入接地网的测量电流/A	41.08	42.81	38.24
架空地线的分流百分比/%	20	21.649 5	25.819 6
变电站接地电阻测量误差/%	25	27.631 6	34.806 5

LGJ95/55 的直流电阻为 $0.299 2 \Omega/\text{km}$, LGJ120/77 的直流电阻为 $0.234 6 \Omega/\text{km}$, LGJ240/40 的直流电阻为 $0.120 9 \Omega/\text{km}$ 。架空地线的电阻越小,架空地线分流越多,变电站接地电阻的测量误差越大。

3.2 接地装置对地电压测量偏差的影响

接地装置对地电压测量偏差示意图见图 6。

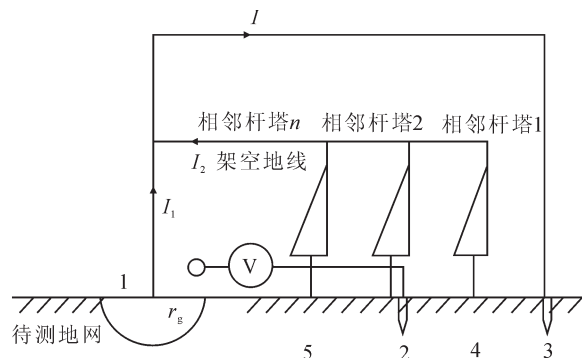


图6 接地装置对地电压测量偏差示意图

Fig. 6 Grounding to place voltage measurement deviation schematic drawing

在图 6 中,在不考虑杆塔架空地线分流作用时,1、2 电极之间的总电位^[20]为

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_g} - \frac{1}{d_{12}} + \frac{1}{d_{23}} - \frac{1}{d_{13}} \right) \quad (6)$$

式(6)中: ρ 为土壤电阻率; r_g 为变电站接地网的等效半径; I 为流入大地的电流。而接地装置 1 的实际接地电阻值为 $R = \frac{\rho}{2\pi r_g}$,因此式(6)除以 I 应当等于 R ,由此得到 $d_{12} = 0.618 d_{13}$,这就是传统的 0.618 法。

在利用架空线路作为电流、电压线,考虑杆塔架空地线分流作用后,1、2 电极间电位 U_{12} 由于架空地线的短接和流经大地电流减小的共同作用下降低,设 2、3 电极间靠近 3 电极且架空地线未和地绝缘的第一基杆塔为 4,靠近接地装置 1 且架空地线未和地绝缘的第一基杆塔为 5,则此时 1、2 电极之间的总电位 U' 为

$$U' = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_g} - \frac{1}{d_{15}} + \frac{1}{d_{43}} - \frac{1}{d_{13}} \right) \quad (7)$$

设 $d_{13} = 1$,则此时变电站接地电阻测量误差为

$$\frac{U-U'}{U} \times 100\% = r_{\xi} \left(\frac{1}{d_{43}} - \frac{1}{d_{15}} - 1 \right) > 0 \quad (8)$$

式(8)中: $d_{43} \in [0, 0.382]$; $d_{15} \in [0, 0.618]$, 根据式(8)分析, 变电站接地电阻测量误差随 d_{43} 的增大而减小, 随 d_{15} 的增大而增大, 在实际测试中的含义则是架空地线的短接的范围越小, 变电站接地电阻测量误差越小。

4 结论

1) 利用已有的架空线路作为电流、电压线测量接地装置接地电阻时, 若线路的架空地线未与地绝缘, 会产生较大的测量误差, 造成接地装置的接地电阻测量值偏小。

2) 这种放线方式下测量误差的来源包括流经接地装置的电流测量偏差和接地装置对地电压测量偏差两方面。前一方面接地电阻测量误差受变电站接地电阻值、电流回路电阻值、杆塔接地电阻值、架空地线类型的影响; 后一方面接地电阻测量误差主要受架空地线的短接范围的影响。

3) 在使用大电流法测量接地装置接地电阻时, 应尽量人工放线, 避免利用已有的架空线路作为电流、电压测量线, 减小架空地线的分流作用; 若是人工放线困难, 必须使测试范围内架空地线对地绝缘或断开。

参考文献:

- [1] 曹 斌, 彭 勇, 杨德伦, 等. 水电站接地装置存在的问题分析与改造措施探讨[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 99-102.
CAO Bin, PENG Yong, YANG De-lun, et al. Analysis of a hydro-electric station grounding device problems and rebuilding measures[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 99-102.
- [2] 王怡华, 王丰华, 金之俭, 等. 有限元分析法在变电站接地电阻短距测量方法中的应用[J]. 高压电器, 2010, 46(7): 81-84.
WANG Yi-hua, WANG Feng-hua, JIN Zhi-jian, et al. Application of finite element method to the grounding resistance measurement with short leads[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7): 81-84.
- [3] 何金良, 沈亚东, 孙为民, 等. 发变电站接地系统的季节系数分析[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 1-3.
HE Jin-liang, SHEN Ya-dong, SUN Wei-min, et al. Analysis on seasonal coefficients of grounding systems for power plants and substations[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3): 1-3.
- [4] 李景禄, 郑瑞臣, 杨廷方, 等. 关于接地工程中相关参数取值的探讨[J]. 高压电器, 2004, 40(4): 264-266.

- LI Jing-lu, ZHENG Rui-chen, YANG Ting-fang, et al. Discussion on defining the values of related parameters about grounding project[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(4): 264-266.
- [5] DL/T 475—2006. 接地装置特性参数测量导则[S].
DL/T 475—2006. Measure guide for characteristic parameter of grounding sets[S].
- [6] 李澍森. 异频法测量大型地网接地电阻的研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(3): 37-39.
LI Shu-sen. The research of the large scale grids resistance measurement[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(3): 37-39.
- [7] 陈鹏云, 刘 晋, 吴伯华, 等. 大型地网接地电阻异频测量方法[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 46-47.
CHEN Peng-yun, LIU Jin, WU Bo-hua, et al. A research on method of measuring earthing resistance of large earthing grid with non-power-frequency test current[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 46-47.
- [8] 郭华俊, 董巧元, 姚晓芳, 等. 大型接地装置接地电阻测量及其影响因素[J]. 高电压技术, 2002, (12): 47-48.
GUO Hua-jun, DONG Qiao-yuan, YAO Xiao-fang, et al. Measurement of grounding resistance of large grounding grid and the effect factors[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(12): 47-48.
- [9] 李景禄. 实用电力接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10] 何金良, 余绍峰, 曾 嵘, 等. 变电所附近地下构筑物对接地电阻测量的影响[J]. 高压电器, 2004, 40(1): 1-2.
HE Jin-liang, YU Shao-feng, ZHENG Rong, et al. Influence of neighboring underground metal object on measurement of substation grounding resistance[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(1): 1-2.
- [11] 刘 春, 何俊佳, 刘 浔. 接地电阻影响因素的研究[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 19-21.
LIU Chun, HE Jun-jia, LIU Xun. Study of influence factors on grounding resistance[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 19-21.
- [12] 黄锐锋, 李 琳, 张 波, 等. 变电站接地网接地电阻近距离测法与系统开发[J]. 高电压技术, 2004, 30(9): 27-29.
HUANG Rui-feng, LI Lin, ZHANG Bo, et al. Novel method for measuring the grounding resistance of the substation grid with short leads and the system development[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 27-29.
- [13] 饶 宏. 电位降法测量接地电阻时电流极引线长度的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 41-44.
RAO Hong. Influence of length of current electrode in grounding resistance measurement by fall-of-potential method[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 41-44.
- [14] 邹建明, 蒋静坪, 李阳春. 大型地网接地电阻测试方法的

(下转第 55 页)

- test[J]. Hebei Electric Power, 2005, 24(5): 33-34.
- [10] 宁凤辉. 浅谈断路器电容器介质损耗问题[J]. 电力电容器, 2002, 18(4): 35-38.
NING Feng-hui. Brief discussion on the dielectric loss of circuit-breaker capacitor[J]. Power Capacitor, 2002, 18(4): 35-38.
- [11] 李志兵, 许沛丰, 刘华伟, 等. 断路器电容器介损随电压变化关系研究[J]. 电力电容器, 2007, 28(6): 26-30.
LI Zhi-bing, XU Pei-feng, LIU Hua-wei, et al. Research on dielectric loss variation of circuit-breaker capacitors with voltage[J]. Power Capacitor, 2007, 28(6): 26-30.
- [12] 许沛丰, 高军委, 张予洛, 等. 对断路器电容器电容及介损测量预试方法的探讨[J]. 电力电容器, 2007, 28(4): 53-56.
XUE Pei-feng, GAO Jun-wei, ZHANG Yu-luo, et al. Discussion about the way to measure capacitance and dielectric loss of circuit breaker capacitor[J]. Power Capacitor, 2007, 28(4): 53-56.
- [13] 吕延峰, 钟连宏. 介损测量技术及其最新发展[J]. 高电压技术, 1996, 22(2): 29-34.
LÜ Yan-feng, ZHONG Lian-hong. Dielectric loss measurement and its new development[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(2): 29-34.
- [14] 林国庆. 介质损耗数字化测量方法研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(2): 35-38.
LIN Guo-qing. The investigation of a digital dielectric loss measurement method[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2): 35-38.
- [15] 张胜发. 绝缘介质损耗测量技术及变频测量装置研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2001.
- [16] 王爱国, 杨仕友, 倪光正, 等. 基于准同步离散傅里叶变换的介损测量方法[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 44-45.
WANG Ai-guo, YANG Shi-you, NI Guang-zheng, et al. Dielectric loss measurement method based on quasi-synchronous DFT[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(10): 44-45.
- [17] 刘继芳. 变频测量技术在高压电气设备绝缘介质损耗测量中的应用[J]. 安徽电力, 2006, 23(1): 54-56.
LIU Ji-fang. Application of frequency conversion technology in measurement of high voltage dielectric loss[J]. Anhui Electric Power, 2006, 23(1): 54-56.
- [18] 李向军, 刘晓东. 串联谐振法在电流互感器高电压介损测试中的应用[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(4): 46-48.
LI Xiang-jun, LIU Xiao-dong. Application of series resonance method in current mutual inductance high voltage medium loss testing[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26(4): 46-48.
- [19] 谢明, 丁康. 频谱分析的校正方法[J]. 振动工程学报, 1994, 7(2): 172-179.
XIE Ming, DING Kang. Rectifying technique of spectrum analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 1994, 7(2): 172-179.
- [20] 赵文春, 马伟明, 胡安. 电机测试中谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 83-87.
ZHAO Wen-chun, MA Wei-ming, HU An. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in the electric machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 83-87.
- [21] 尚勇, 杨敏中, 王晓蓉, 等. 谐波分析法介质损耗因数测量的误差分析[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 67-71.
SHANG Yong, YANG Min-zhong, WANG Xiao-rong, et al. Error analysis for the dielectric loss factor measurement based on harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 67-71.
- [22] Q/CSG 1 0007—2004. 电力设备预防性试验规程[S].
陈伟(1984—), 男, 工程师, 现从事防雷过电压及高压试验工作。

(上接第 49 页)

- 探讨[J]. 电力建设, 2003, 24(3): 23-26.
ZOU Jian-ming, JIANG Jing-ping, LI Yang-chun. Inquisition into testing method for ground resistance of large ground network[J]. Electric Power Construction, 2003, 24(3): 23-26.
- [15] 李景禄. 现代防雷技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [16] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] 张波, 白永胜, 杨杰, 等. 对补偿法测 2 层土壤中接地网接地电阻的修正[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 31-33.
ZHANG Bo, BAI Yong-sheng, YANG Jie, et al. Modification of the resistance value of grounding grids measured by the compensating method[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 31-33.
- [18] GBT 17949. 1—1999. 接地系统的土壤电阻率、接地阻抗和地表电位测量导则[S].
- [19] ANSI/IEEE Std 367—1987. IEEE recommended practice for determining the electric power station ground potential rise and induced voltage from a power fault[S].
- [20] 李景禄. 接地装置的运行与改造[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- 刘玮(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统过电压及其保护。
- 聂藏(1986—), 女, 本科, 助理工程师, 主要研究方向为变电设备的运行和维护。