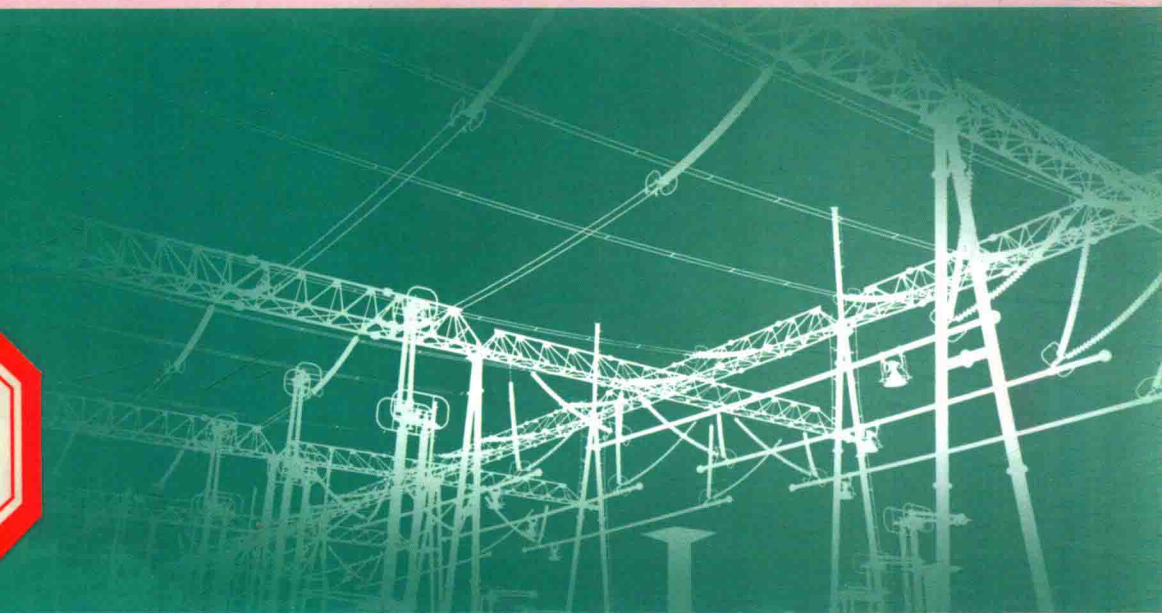


电网设备状态检测技术培训教材



电容型设备相对介质损耗因数 及电容量比值测量

国网技术学院 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网设备状态检测技术培训教材



电容型设备相对介质损耗因数 及电容量比值测量

国网技术学院 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为切实提高电网设备状态检测人员技术水平,确保状态检测人员技术集中培训工作规范、有序实施,国家电网公司组织编写了《电网设备状态检测技术培训教材》丛书。丛书目前有六个分册,本分册为《电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量》。

本分册主要内容包括电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量基本原理、带电检测仪现场操作、测试数据分析及设备状态诊断。附录包括练习题库、作业指导书、技能操作考核评分表、带电检测报告和变电站(发电厂)第二种工作票。

本书可供电力系统工程技术人员和管理人员学习及培训使用,也可作为电力职业院校教学及新入职员工培训的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量 / 国网技术学院编. —北京:中国电力出版社, 2015. 5

电网设备状态检测技术培训教材

ISBN 978-7-5123-7568-0

I. ①电… II. ①国… III. ①电容器-介质损耗-因数-技术培训-教材②电容器-比值-电容测量-技术培训-教材
IV. ①TM53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 072836 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 5 印张 79 千字

印数 0001—2000 册 定价 26.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《电网设备状态检测技术培训教材》

编 审 人 员

吕 军 彭 江 冀肖彤 张祥全 周新风
杨本渤 徐玲玲 闫春雨 焦 飞 程 序
杨 柳 杨 健 陈威斋 张 鑫 赵义术
马志广 战 杰 牛 林

《电容型设备相对介质损耗因数及 电容量比值测量》分册

编 写 人 员

主 编 张 彦 (国网技术学院)

副 主 编 崔金涛 (国网技术学院)

编写人员 高树国 (国网河北省电力公司)

林长海 (国网河北省电力公司)

冯正军 (国网河北省电力公司)

叶兆平 (国网福建省电力有限公司)

习建军 (保定天腾电气有限公司)

王 伟 (国网山东电力集团公司)

马梦朝 (国网技术学院)

鲁国涛 (国网技术学院)

黄金鑫 (国网技术学院)

李艳萍 (国网技术学院)



电网设备状态检测技术培训教材

电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量

前言

近年来,国家电网公司大力推行电网设备状态检测技术,为切实提高电网设备状态检测人员技术水平,确保状态检测工作规范、扎实、有效开展,公司先后于2013年和2014年委托国网技术学院组织开展了状态检测人员技术集中培训并积累了一定经验。为确保后续培训工作规范、有序实施,国家电网公司组织专家编写了《电网设备状态检测技术培训教材》丛书。

本丛书编写坚持系统、精炼、实用、配套的原则,整体规划,统一协调,分步实施。目前已完成《红外热像检测》《电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量》《开关柜暂态地电压与超声波局部放电检测》《GIS特高频与超声波局部放电检测》《油中溶解气体分析》和《SF₆气体检测》六个分册,每个分册主要由学习任务、练习题库、作业指导书、技能操作考核、检测报告、变电站(发电厂)第二种工作票组成。

本丛书是在国网技术学院两年集中培训试用基础上经过修改完善形成的任务导向型培训教材,也是国家电网公司各单位状态检测技术研究及应用成果的结晶。本丛书可供电力系统工程技术人员和管理人员学习及培训使用,也可作为电力职业院校教学及新入职员工培训的参考资料。

由于时间仓促,书中疏漏之处在所难免,望广大读者批评指正。

编者

2015年4月



目 录

前言

任务一

电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量

基本原理 / 1

- 一、电容型设备介质损耗因数和电容量的基本介绍 / 2
- 二、测量方法 / 3
- 三、信号取样装置及方式 / 6
- 四、相对介质损耗因数测量法 / 12

任务二

电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值带电

检测仪现场操作 / 18

- 一、仪器的组成及工作原理 / 18
- 二、仪器应具备的主要功能及技术指标 / 20
- 三、现场测试应满足的要求 / 21
- 四、参考设备的选择 / 22
- 五、现场带电检测流程及注意事项 / 22
- 六、数据记录及试验报告编制 / 24

任务三

电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量

测试数据分析及设备状态诊断 / 27

一、试验数据分析方法 / 27

二、典型案例分析 / 29

附录 A 电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量 练习题库 / 39

附录 B 电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量 作业指导书 / 52

附录 C 电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量 技能操作考核评分表 / 61

附录 D 电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量 带电检测报告 / 68

附录 E 变电站（发电厂）第二种工作票 / 69

参考文献 / 72



● **学习情境描述** 本学习情境为电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量学习，包括其基本原理、操作方法、数据分析等。

● **教学目标** 熟悉电流互感器、电容式电压互感器、耦合电容器和变压器套管等电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值带电检测的基本原理，熟练掌握相对介质损耗和电容量带电检测仪器的现场操作方法、相关注意事项和标准检测流程，掌握检测报告的编制方法，掌握应用相对介质损耗因数和电容量比值的带电测试结果分析设备的运行状况。

● **教学环境** 多媒体教室。配置电流互感器、升压装置、介质损耗因数及电容量带电检测仪、电流取样单元等仪器设备的高压实验室。

任务一 电容型设备相对介质损耗因数及电容量比值测量基本原理

教学目标 通过本任务的学习掌握电容型设备介质损耗因数及电容量比值的基本知识，了解相对测量法的原理及优点，了解电流取样原理及其装置，掌握仪器的测量原理。

任务描述 本任务了解电容型设备介质损耗因数及电容量相对测量的原理，了解电流取样原理及各类装置优缺点。

任务准备 预习电容型设备常见的绝缘缺陷、介质损耗因数和电容量例行停电试验的原理、数字信号处理技术。

任务实施 系统讲解电容型设备介质损耗因数和电容量的带电检测基本原理。

相关知识 《电容型设备高电压试验技术》、《电容型设备绝缘带电检测技术》、《数字信号处理技术》、《电力设备带电检测技术规范（试行）》（国家电网生变电〔2010〕11号）、Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》、Q/GDW 537—2010《电容型设备及金属氧化物避雷器绝缘在线监测装置技术规范》、Q/GDW 540.3—2010《变电设备在线监测装置检验规范 第3部分：电容型设备及金属氧化物避雷器绝缘在线监测装置》。

一、电容型设备介质损耗因数和电容量的基本介绍

电介质在电压作用下，由于电导和极化将发生能量损耗，统称为介质损耗。当设备绝缘良好时，介质损耗是非常微小的；当绝缘出现缺陷时，介质损耗会明显增大，通常会使绝缘介质温度升高，绝缘性能劣化，甚至导致绝缘击穿，失去绝缘作用。

在交流电压作用下，电容型设备绝缘的等值电路如图 1-1 所示。流过介质的电流 I 由电容电流分量 I_c 和电阻电流分量 I_r 两部分组成，电阻电流分量 I_r 就是因介质损耗而产生的电流，其流过介质的电流偏离电容性电流的角度 δ 称为介质损耗角，其正切值 $\tan\delta$ 为介质损耗因数，反映了绝缘介质损耗的大小，并且 $\tan\delta$ 仅取决于绝缘特性而与材料尺寸无关，可以较好地反映电气设备的绝缘状况。通过介质电容量 C 特征参数也能反映设备的绝缘状况，通过测量这两个特征量以掌握设备的绝缘状况。

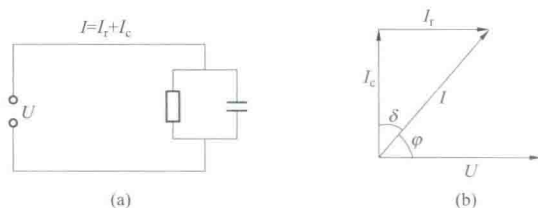


图 1-1 电容型设备绝缘的等值电路

(a) 等值电路图；(b) 向量示意图

电容型设备通常是指采用电容屏绝缘结构的设备，如电容型电流互感器、电

容式电压互感器、耦合电容器、电容型套管等，其数量约占变电站电气设备的40%~50%。这些设备均是通过电容分布强制均压的，其绝缘利用系数较高。电容型设备由于结构上的相似性，实际运行时可能发生的故障类型也有很多共同点，常见缺陷类型有：① 绝缘缺陷（严重时可能爆炸）。包括设计不周全，局部放电过早发生。② 绝缘受潮。包括顶部等密封不严或开裂，受潮后绝缘性能下降。③ 外绝缘放电。爬距不够或者脏污情况下，可能出现沿面放电。④ 金属异物放电。制造或者维修时残留的导电遗物引起放电。其中，绝缘受潮缺陷约占电容型设备缺陷的85%，绝缘受潮往往会引起绝缘介质损耗增加，导致击穿。对于电容型绝缘的设备，通过对其介电特性的监测，可以发现尚处于早期阶段的绝缘缺陷。

介质损耗因数是设备绝缘由介质损耗引起的有功电流分量和设备总电容电流之比，它对发现设备绝缘的整体劣化较为灵敏，如包括设备大部分体积的绝缘受潮；而对局部缺陷则不易发现。测量绝缘的电容 C ，除了能给出可能引起极化过程改变的介质结构信息（如均匀受潮或者严重缺油）外，还能发现严重的局部缺陷（如绝缘击穿），其灵敏程度同绝缘损坏部分与完好部分体积之比有关。

二、测量方法

（一）测量方法分类

电容型设备介质损耗因数和电容量比值带电检测按照参考相位获取方式不同可以分为绝对测量法和相对测量法两种。

1 绝对测量法

绝对测量法是指通过串接在被试设备 C_x 末屏接地线上，以及安装在该母线TV二次端子上的信号取样单元，分别获取被试设备 C_x 的末屏接地电流信号 I_x 和TV二次电压信号。电压信号经过高精度电阻转化为电流信号 I_n ，两路电流信号经过滤波、放大、采样等数字处理，利用谐波分析法分别提取其基波分量，并计算出其相位差和幅度比，从而获得被试设备的绝对介质损耗因数和电容量，其原理如图1-2（a）所示。

图1-2（a）是利用TV（CVT）的二次侧电压（即假定其与设备运行电压 U_n 的相位完全相同）作为参考信号的绝对值测量法向量示意图，此时仅需准确

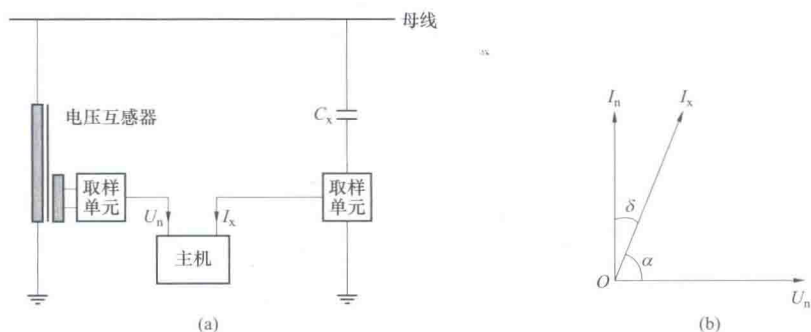


图 1-2 绝对测量法

(a) 测试原理图；(b) 向量示意图

获得设备运行电压 U_n 和末屏接地电流 I_x 的基波信号幅值及其相位夹角 α ，即可求得介质损耗 $\tan\delta$ 和电容量 C_x ，如式 (1-1) 和式 (1-2) 所示。

$$\tan\delta = \tan(90^\circ - \alpha) \quad (1-1)$$

$$C_x = I_x \cos\delta / \omega U_n \quad (1-2)$$

绝对值测量法尽管能够得到被测电容型设备的介质损耗和电容量，但现场应用易受 TV (CVT) 自身角差误差、外部电磁场干扰及环境温湿度变化的影响。

2 相对测量法

相对测量法是指选择一台与被试设备 C_x 并联的其他电容型设备作为参考设备 C_n ，通过串接在其设备末屏接地线上的信号取样单元，分别测量参考电流信号 I_n 和被测电流信号 I_x ，两路电流信号经滤波、放大、采样等数字处理，利用谐波分析法分别提取其基波分量，计算出其相位差和幅度比，从而获得被试设备和参考设备的相对介质损耗差值和电容量比值。考虑到两台设备不太可能同时发生相同的绝缘缺陷，因此通过它们的变化趋势，可判断设备的劣化情况，其原理如图 1-3 (a) 所示。

图 1-3 (b) 是利用另一只电容型设备末屏接地电流作为参考信号的相对值测量法的向量示意图，此时仅需准确获得参考电流 I_n 和被测电流 I_x 的基波信号幅值及其相位夹角 α ，即可求得相对介质损耗差值 $\Delta\tan\delta$ 和电容量 C_x/C_n 的值，如式 (1-3) 和式 (1-4) 所示。

$$\Delta\tan\delta = \tan\delta_2 - \tan\delta_1 \approx \tan(\delta_2 - \delta_1) = \tan\alpha \quad (1-3)$$

$$C_x/C_n = I_x/I_n \quad (1-4)$$

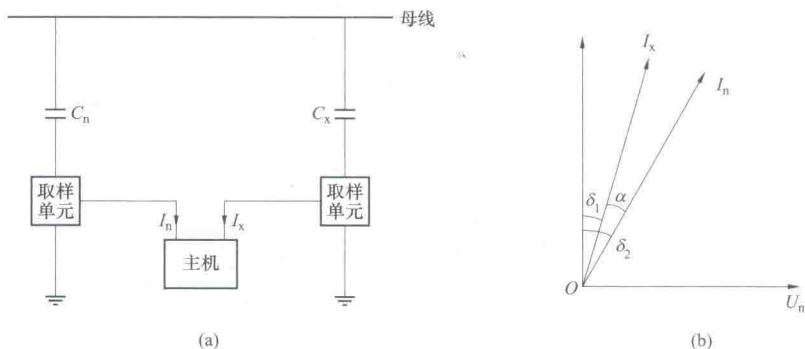


图 1-3 相对测量法

(a) 测试原理图; (b) 向量示意图

相对介质损耗因数是指在同相相同电压作用下，两个电容型设备电流基波矢量角度差的正切值 ($\Delta \tan \delta$)。相对电容量比值是指在同相相同电压作用下，两个电容型设备电流基波的幅值比 (C_x/C_n)。

(二) 测量方法比较

1 绝对测量法优缺点

绝对测量法的主要优点是能够直接带电测量电容型设备的介质损耗因数和电容量的绝对值，与传统停电测量的原理和判断标准较为类似，但由于需要从电压互感器的二次侧获取电压参考信号，该方法存在以下缺点：

(1) 测量误差较大，主要由于以下几个方面造成：① TV 固有角差的影响。根据国家标准对电压互感器的角误差的容许值规定，对于目前绝大多数 0.5 级电压互感器来说，使用其二次侧电压作为介质损耗测量的基准信号，本身就可能造成 $\pm 20'$ 的测量角差，即相当于 ± 0.006 的介质损耗测量绝对误差。而正常电容型设备的介质损耗通常较小，仅在 0.002~0.006 之间，显然这会严重影响检测结果的准确性。② TV 二次负荷的影响。电压互感器的测量精度与其二次侧负荷的大小有关，如果 TV 二次负荷不变，则角误差基本固定不变。介质损耗测量时基准信号的获取只能与继电保护和仪表共用一个线圈，且该线圈的二次负荷主要由继电保护决定。随着变电站运行方式的不同，所投入使用的继电保护会作出相应变化，所以 TV 的二次负荷通常是不固定的，这必然会导致其角误差改变，从而影响介质损耗测试结果的稳定性。

(2) 需要频繁操作 TV 二次端子, 增加了误碰保护端子引起故障的几率。

2 相对测量法优点

相对值测量法能够克服绝对值测量法易受环境因素影响、误差大的缺点, 因为外部环境 (如温度等)、运行情况 (如负载容量等) 变化所导致的测量结果波动, 会同时作用在参考设备和被试设备上, 它们之间的相对测量值通常会保持稳定, 故更容易反映出设备绝缘的真实状况; 同时, 由于该方式不需采用 TV (CVT) 二次侧电压作为基准信号, 故不受到 TV 角差变化的影响, 且操作安全, 避免了由于误碰 TV 二次端子引起的故障。

三、信号取样装置及方式

现场进行电容型设备相对介质损耗因数和电容量比值测试需要获得电容型设备的末屏 (电流互感器、变压器套管) 或者低压端 (耦合电容器、电容式电压互感器) 的接地电流, 但由于电容型设备的末屏 (或低压端) 大都在其本体上的二次端子盒内或设备内部直接接地, 难以直接获取其接地电流, 因此需要预先对其末屏 (或低压端) 接地进行改造, 将其引至容易操作的位置, 并通过取样单元将其引入到测试主机。

(一) 信号取样单元

信号取样单元的作用是将设备的接地电流引入到测试主机, 测试准确度及使用安全性是其技术关键, 必须避免对人员、设备和仪器造成安全伤害。电容型设备带电测试取样装置主要可以分为两种, 即接线盒型和传感器型 (其中传感器型还可以分为有源传感器和无源传感器)。

1 接线盒型电流取样单元

接线盒型取样单元串接在设备的接地引下线中, 主要功能是提供一个电流测试信号的引出端子并防止末屏 (或低压端) 开路, 没有信号测量功能, 测试时需通过测试电缆将电流引入带电测试仪内部的高精度穿心电流传感器进行测量, 如图 1-4 所示。该型取样单元主要由外壳、防开路保护器、放电管、短接连片和操作隔离开关等部件构成, 其中短连接片和隔离开关并接后串接在接地引下线回路中, 平常运行时短连接片和隔离开关均闭合, 构成双重保护防止开路, 测量时先打开连接片并将测试线接到该接线柱, 拉开小隔离开关即可开始测量。防开路保护器可有效避免因末屏 (或低压端) 引下线开断、测量引线损坏或误操作所

导致的末屏开路，保证信号取样的安全性。

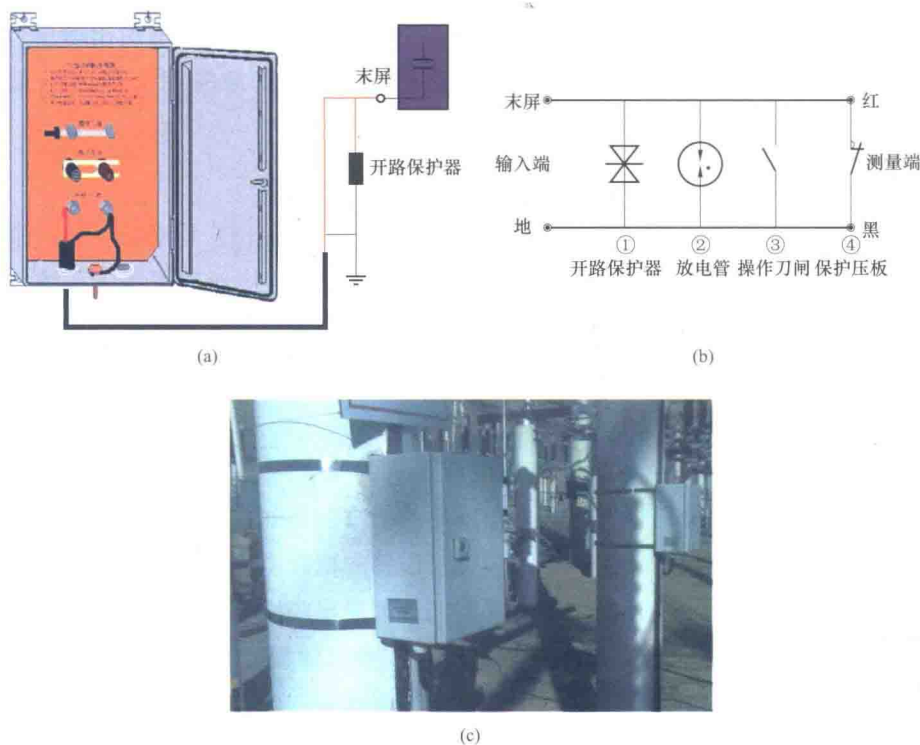


图 1-4 接线盒型取样单元

(a) 内部结构示意图；(b) 原理图；(c) 外观图

接线盒型取样单元应满足以下要求：① 取样单元应采用金属外壳，具备优良的防锈、防潮、防腐性能，且便于安装固定在被测设备下方的支柱或支架上。② 取样单元内部含有信号输入端、测量端及短接连接片等，并应采用多重防开路保护措施，有效防止测试过程中因接地不良和测试线脱落等原因导致的末屏电压升高，保证测试人员的安全，且完全不影响被测设备的正常运行。防开路保护器通常有两个大功率二极管反向并联而成，设备的末屏（或低压端）对地电压大于 1V 时，防开路保护器即可发生作用，把末屏（或低压端）接地电压限位在 1V 之内，且可长期通过 5A 以上的工频电流，同时可承受 10kA 的冲击电流。③ 对于套管类设备的信号取样，应根据被监测设备的末屏接地结构，设计和加工与之相匹配的专用末屏引出装置，并保证其长期运行时的电气连接及密封性



能。④ 对于线路耦合电容器的信号取样,为避免对载波信号造成影响,应采用在原引下线上直接套装穿芯式零磁通电流传感器的取样方式。⑤ 回路导线材质宜选用多股铜导线,截面积不小于 4mm^2 ,并应在被测设备的末屏引出端就近加装可靠的防断线保护装置。⑥ 取样单元应免维护,正常使用寿命不应低于 10 年。

2 传感器型电流取样单元

传感器型取样单元可分为无源传感器和有源传感器两种,均采用穿芯式取样方式,就近安装在被测电容型设备的末屏(或低压端)接地引下线上,该型取样单元留有标准航空插头的插孔,平常运行时插孔有端盖密封,测量时用带有航空插头的试验引线将被测电流信号转换成电压信号,并引入测试主机进行测量。

(1) 无源电流传感器。由于励磁磁势的存在,无源电流传感器测量误差较大,电容型设备末屏(低压端)接地电流通常为毫安级,传感器的励磁阻抗很小,而且又必须采用穿芯取样方式,角度差的微小变化即可以引起介损值较大的变化,故无源传感器通常无法保证相位变换误差的精确度和稳定性,难以满足介质损耗参数的测量要求。目前该类传感器已逐渐退出应用。

(2) 有源电流传感器。采用有源零磁通技术有效提高了小电流传感器检测精度,除了选用起始导磁率较高、损耗较小的特殊合金作铁芯外,还借助电子信号处理技术对铁芯内部的激磁磁势进行全自动的跟踪补偿,保持铁芯工作在接近理想的零磁通状态。有源传感器能够准确检测 $100\mu\text{A} \sim 1000\text{mA}$ 范围内的工频电流信号,相位变换误差不大于 $\pm 0.02^\circ$,并具有极好的温度特性和抗电磁干扰能力,解决了对电容型设备末屏(或低压端)电流信号精确取样的技术难题。目前现场应用的传感器型取样单元主要以有源型传感器为主,如图 1-5 所示。

传感器型取样单元应满足以下要求:① 采用穿芯结构,输入阻抗低,能够耐受 10A 工频电流的作用以及 10kA 雷电流的冲击。② 具有完善的电磁屏蔽措施和先进的数字处理技术,可确保介质损耗测试结果不受谐波干扰及脉冲干扰的影响,绝对检测精度应达到 $\pm 0.05\%$ 。③ 具有较好的防潮和耐高低温能力。④ 采用即插式标准接口设计,方便操作。

3 两种取样单元的比较

目前电网中常用的取样单元主要为接线盒型和有源电流传感器型两种,它们各自的优缺点如下:

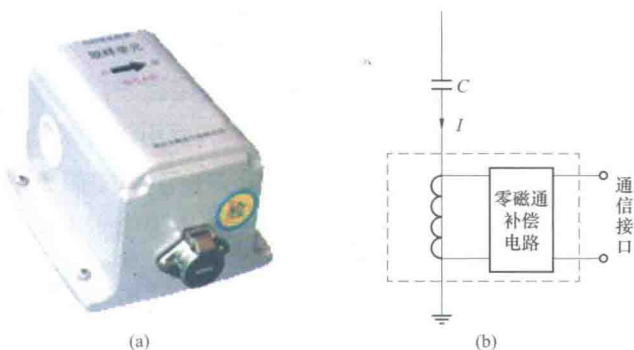


图 1-5 有源传感器型取样单元

(a) 外观图；(b) 有源电流传感器原理

(1) 接线盒型取样单元的优点：① 结构简单，价格相对较低便宜；② 受现场电磁场干扰较小；③ 停电例行试验时，可以通过操作取样单元内的隔离开关来断开接地，而无需登高打开压接螺母，操作方便且安全性高；④ 只需要对仪器主机器进行定期校验即可，无需对所有取样单元进行定期校验；⑤ 电流信号均采用仪器主机的内置的两个高精度传感器进行测量，测试误差可以相互抵消，提高了检测的准确性。

(2) 接线盒型取样单元的缺点：① 整个末屏（或低压端）接地回路由于串入了隔离开关等节点，存在断路风险，给安全运行带来隐患；② 现场测试时，由于需要操作隔离开关断开末屏接地，存在操作不当造成末屏（或低压端）失去接地的风险。

(3) 有源传感器型取样单元的优点：① 穿芯电流传感器套在末屏（或低压端）接地线上，整个接地回路上无断点，不会给设备运行带来风险；② 现场测试接线简单、明了，操作方便。

(4) 有源传感器型取样单元的缺点：① 由于其内部采用了放大器等电子元件，其可靠性及寿命稍差；② 测试系统的定期校验较为困难，需要把每一个取样单元连同试验仪器都进行校验，数量庞大，且传感器安装在现场难以校验；③ 相对于接线盒型，传感器型取样单元在接地引下回路无断开点，停电例行试验工作仍然需要登高打开末屏（或低压端）接地压接螺母，较为不便；④ 由于每台设备的接地电流都通过传感器进行测量，从而引入了更多的测量误差，降低了测量的准确度；⑤ 带电测试结果异常时，往往需要首先检查传感器是否存在