

D L S B W X Z D Y Y F X S Y

● 周武仲 编著

(第二版)

电力设备 维修诊断与预防性试验

D IAN LISHE BEI

WEI XIU

ZHENDUAN

YU / YUFANGXING

SHIYAN



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

第 1 章 电力系统基础知识

1.1 电力系统组成

电力设备

维护诊断与预防性

技术

1.2 电力系统运行

1.3 电力系统保护

1.4 电力系统稳定

1.5 电力系统调度

1.6 电力系统规划



中国电力出版社

(R 为测定仪)

季节系数

(第二版)

主要内容

本书主要介绍电力系统接地和绝缘的基本概念、基本理论和基本计算方法。本书可作为电力系统及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

本书共分五章。第一章介绍电力系统接地和绝缘的基本概念和基本理论；第二章介绍电力系统接地和绝缘的基本计算方法；第三章介绍电力系统接地和绝缘的基本试验方法；第四章介绍电力系统接地和绝缘的基本设计方法；第五章介绍电力系统接地和绝缘的基本运行维护方法。

本书可作为电力系统及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

本书可作为电力系统及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

本书可作为电力系统及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

本书可作为电力系统及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

图 12-13 电力系统接地和绝缘的基本概念和基本理论

电力设备

维修诊断与预防性试验

周武仲 编著

中国电力出版社出版

(北京三里河路 8 号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京市同江印刷厂印刷

曹益吉书号 00000000

2008 年 1 月第 1 版

2008 年 3 月第 2 版 2008 年 3 月北京第 1 次印刷

787 毫米×1095 毫米 16 开本 11 印张 336 千字

定价 32.00 元 书号 9501-15000 册



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

(第二册)

内 容 提 要

本书主要讲述电力设备维修、诊断与试验方面较为系统的知识。主要内容包括：电力设备预防性试验；旋转电机；变压器；高压开关设备电力电缆及其附件；互感器；电源设备；避雷器；套管和绝缘子；低压开关装置；带电测温诊断技术；电力系统接地和接地电阻测量。

本书的特点是实用性和先进性。本书紧密结合我国现行有关规程，总结编者多年实践经验编写而成；本书编写过程中参考了国外最新书籍和资料，对一些新技术、新方法作了较为全面的介绍。

本书读者对象为从事电力设备管理、维修与试验的工程技术人员，亦可供高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力设备维修诊断与预防性试验/周武仲编著. —2 版.
北京：中国电力出版社，2008

ISBN 978-7-5083-6527-5

I. 电… II. 周… III. ①电力系统-电气设备-维修②
电力系统-电气设备-电工试验 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 205991 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 4 月第一版

2008 年 3 月第二版 2008 年 3 月北京第四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14 印张 336 千字

印数 9001—12000 册 定价 25.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

前言

第二版前言

本书自2002年出版以来,满足了广大电力技术人员的需求,至今已陆续进行了三次印刷,受到广大读者的欢迎,作者考虑到经过这5年多的时间,我国电力工业又取得了相当的发展,发电量已居世界第二位,电气设备在设计、制造、维修、诊断、试验等方面也有了一定的进步。原有的《电力设备预防性试验规程》(简称《预规》)在某些方面已显得有不足之处,而一些电网企业也已陆续出版了企业的《电力设备预防性试验规程》(简称《企业预规》),并已实施多年,取得了一定的效果。目前,我国新的《电力设备预防性试验规程》正在修订之中,在这发展过程时期,为了使读者对电力设备的维修、诊断与预防性试验有一个较新的了解和掌握,本书在原版的基础上结合设备设计、制造、维修、诊断、试验新技术的采用等方面加以修改和补充,以满足广大读者的需求。待新的国家《预规》出版后,再进行修改和补充。

作者

2008年1月

前言

2008年1月



前言

第一版前言

随着我国社会主义现代化建设的快速发展,我国的电力工业取得了巨大的成就,21 世纪的到来也使电力工业面临着新的挑战。电力设备的安全可靠运行是电力工业生产永恒的主题,它直接关系到国民经济的效益和人民的生活。对电气设备进行预防性的维修与试验是电力系统及其设备安全可靠运行的重要保证,它使得电力设备的故障率降到最低。本书编写的目的是给从事电力设备管理、维修与试验的人员提供电力设备试验、维修和故障诊断方面较为系统的知识,同时对高等院校有关专业的学生也具有一定的参考价值。

本书的编写力求做到实用性和先进性。这是基于读者对电气基本知识已有所掌握的前提下编写的,如短路电流的计算;电气设备的基本原理等。有关这方面的知识读者可参考其他有关书籍和手册。本书的试验部分主要是以 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》为依据,并参照国际上有关的试验规范作为对照。本书主要涉及电气一次设备,至于有关继电保护及二次回路部分,由于其专业性较强又篇幅有限,故尚未涉及。

在本书中除了介绍有关的必要的常识外,还尽量吸收国内外的先进技术和资料作为补充。

出自于维修和试验的基本需要,本书对电气设备的基本参数、特征、结构及应用方面进行了介绍,对电气设备的一般性检修作了说明;对电气设备的故障现象和原因也进行了综合;并介绍了诊断(包括检查和试验)的一些基本的具体的方法。

由于篇幅所限,本书着重介绍 220kV 及以下的变、配电装置和 300MW 及以下的中小型旋转电机。这些设备在国民经济中得到了最为广泛的应用。

由于作者水平有限,编写的内容不一定完整,难免有不妥之处,望读者加以批评指正。

作者

2002 年 4 月



目 录

第二版前言	
第一版前言	
第一章 电力设备预防性试验	1
第一节 绝缘电阻、吸收比、极化指数的测量	1
一、概述	三、影响因素和分析判断
二、测量原理	
第二节 泄漏电流试验和直流耐压试验	3
一、概述	三、影响因素和分析判断
二、试验原理	
第三节 介质损失角正切值或功率因数试验	6
一、概述	三、影响因素和分析判断
二、原理	
第四节 交流耐压试验	8
一、概述	三、影响因素和分析判断
二、交流工频耐压试验	四、其他交流耐压试验
第五节 绝缘油试验	11
一、概述	三、补充油和混油
二、运行中变压器油的质量控制	四、绝缘油的再生
第六节 油中溶解气体的色谱分析	14
一、概述	二、故障判断方法
第七节 六氟化硫(SF ₆)的现场测试	17
第二章 旋转电机	20
第一节 三相交流异步电动机	20
一、三相异步电动机的主要分类	四、绝缘系统
二、主要技术参数	五、三相异步电动机维修的一般指南
三、主要结构	六、三相异步电动机的故障及处理
第二节 直流发电机和电动机	37
一、直流电机的分类	四、直流电机检修的一般性指南
二、主要技术参数和结构	五、直流电机的故障及处理
三、绝缘系统	
第三节 同步发电机	48
一、同步发电机的主要分类	四、同步发电机检修的一般性指南
二、同步发电机的主要参数和结构	五、同步发电机故障及处理
三、绝缘系统	

第四节 旋转电机的预防性试验	66
一、同步发电机	
二、交流电动机	
三、直流电机的绝缘试验	
第三章 变压器	73
一、变压器的分类和主要型式	
二、变压器的主要参数及特性	
三、变压器的主要结构	
四、变压器的绕组及其绝缘系统	
五、变压器检修的一般性指南	
六、变压器的故障及诊断	
七、变压器的绝缘试验	
第四章 高压开关设备	99
第一节 断路器	99
一、主要参数	
二、高压断路器的灭弧介质	
三、主要结构及特点	
四、断路器检修的一般性指南	
五、断路器的故障分析	
六、断路器的试验	
第二节 高压隔离开关和负荷开关	117
一、高压隔离开关	
二、高压负荷开关	
第三节 高压熔断器	121
一、高压熔断器分类	
二、熔断器的主要参数	
三、高压熔断器检修一般性指南	
第四节 重合器和分段器	123
一、重合器	
二、分段器	
第五节 成套配电装置及组合电器	125
一、成套配电装置 (开关柜)	
二、全封闭组合电器 (GIS)	
第五章 电缆及其附件	129
一、电缆的结构和分类	
二、电缆的主要参数	
三、电缆附件	
四、电缆检修的一般性指南	
五、电缆的故障分析	
六、电缆的绝缘试验	
七、电缆的故障探测	
第六章 互感器	149
第一节 电压互感器	149
第二节 电流互感器	152
第三节 互感器的检修及故障分析	156
一、互感器的检修的一般性指南	
二、互感器的故障	
第四节 互感器的试验	157
第七章 电源设备	160
第一节 蓄电池组及其充电设备	160
一、蓄电池组	
二、蓄电池的故障及处理	
三、充电设备	

第二节 交直流不间断电源 (UPS)	164
一、UPS 系统	二、UPS 系统的故障处理
第三节 其他电源设备	166
一、电容储能直流系统	二、复式整流直流电源
第八章 避雷器	167
一、保护间隙和管式避雷器	四、避雷器故障
二、阀型避雷器	五、避雷器的试验
三、金属氧化物避雷器 (MOA)	
第九章 套管和绝缘子	175
第一节 结构和分类	175
一、绝缘子	二、绝缘套管
第二节 故障及原因	178
第三节 试验	179
一、套管试验	二、绝缘子试验
第十章 低压开关装置	181
第一节 低压断路器	182
一、低压断路器	四、低压断路器一般性检修指南
二、主要参数和结构	五、低压断路器的故障及处理
三、低压断路器选用条件	
第二节 其他低压电器	192
一、刀开关	四、热继电器
二、熔断器	五、刀熔开关
三、接触器	六、低压电器的试验
第十一章 带电设备红外诊断技术	198
一、红外测温的检测仪器及对其的要求	四、红外线测温温度的计算
二、红外线监测对被测设备和环境的要求	五、电力设备故障的红外诊断
三、红外线测温诊断方法和判断依据	六、对电气设备用红外线测温的实例
第十二章 电力系统接地和接地电阻测量	206
一、概述	三、接地电阻的测量
二、接地装置和接地电阻	四、土壤电阻率及测量



第一章

电力设备预防性试验

电力设备的绝缘系统是电力设备的关键部位,也是较易发生故障的部位。电力设备的预防性试验是及时发现电力设备绝缘缺陷的必要的、有效的手段。国内外有关部门和专业对此都十分重视,虽然在标准及方法上有所不同,但都已作出了规定,并随时间而不断地修改。我国有 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》(以下简称《预规》)。在讨论各种电力设备的维修和试验诊断前,有必要对绝缘预防性试验作一简要的说明,以便读者更好地理解本书的内容。

本章共分下列几部分试验:

- (1) 绝缘电阻、吸收比、极化指数。
- (2) 泄漏电流试验和直流耐压。
- (3) 介质损失角正切值或功率因数试验。
- (4) 交流耐压。
- (5) 绝缘油试验。
- (6) 油中溶解气体的色谱分析。
- (7) 六氟化硫气体的现场测试。

对于各种试验装置的具体操作方法和步骤可参见制造厂的使用说明,本章中就不作详细介绍了。

第一节 绝缘电阻、吸收比、极化指数的测量

一、概述

测量电气设备的绝缘电阻是绝缘试验中最基本、最简便的方法。使用一台兆欧表就可以进行。兆欧表输出的是直流电压。而测量绝缘电阻、吸收比、极化指数的区别是在时间的读数上。由于这三种方法各有其用途和特点,可以互为补充,所以在 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》中都给予了说明。在国外,对极化指数的使用已经比较普遍,我国尚在逐步推广之中。

这三种方法的特点是:

(1) 绝缘电阻。读数时间为 1min。数值应归算到同一温度和过去值相比较,即存在一个温度修正的问题。它可以发现绝缘的整体和贯通性受潮、贯通性的集中缺陷。对局部缺陷反应不灵敏。

(2) 吸收比。采用读数为 1min 和 15s (或 30s) 的绝缘电阻的比值。我国采用 15s。该值和温度无关,不用进行温度的换算,便于比较。可以较好地判断绝缘是否受潮,适用于电容量较大的设备。

(3) 极化指数。采用读数为 10min 和 1min 的绝缘电阻的比值。该值和温度无关,不用进行温度的换算,便于比较。可以很好地判断绝缘受潮。适用于各种电气设备绝缘系统,特别是干式绝缘系统,如旋转电机、电缆、干式变压器等。

二、测量原理

在直流电压的作用下,绝缘中将通过电流,其变化是开始瞬间通过一个很高的电流,并很快地下降,然后缓慢地减少到接近恒定值为止。总的电流组成如下:

(1) 泄漏电流 i_L 。它包括表面泄漏和容积泄漏电流。这是绝缘中带电质点在电场力的作用下发生移动而形成的。电流增加,绝缘的电阻就减少。它基本上和时间无关。

(2) 电容电流 i_c 。它是由快速极化(电子、离子极化)而形成的,是时间的函数,随着时间的增大而快速地减少,直至零。

(3) 吸收电流 i_a 。它是由缓慢极化而形成的(自由离子的移动),也是时间的函数,随着时间的增长而缓慢地减少,它和被试设备的受潮情况有关。

这三种电流的合成便是总电流 i 。在图 1-1 中表示了绝缘在直流电压作用下通过的电流和时间的关系曲线。在图 1-2 中表示了在测绝缘电阻时被试绝缘的等值回路,其中 R_L 表示泄漏电流回路的纯电阻, C 表示电容电流回路中电介质的几何电容, R_a 和 C_a 表示吸收电流回路的等值电阻和电容, E 表示外加的直流电压。

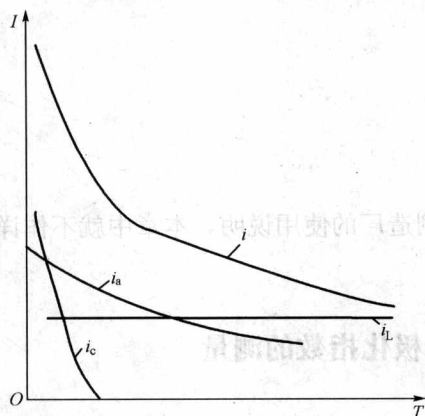


图 1-1 绝缘在直流电压下通过的电流

T —时间; i —总电流; i_a —吸收电流;
 i_c —电容电流; i_L —泄漏电流

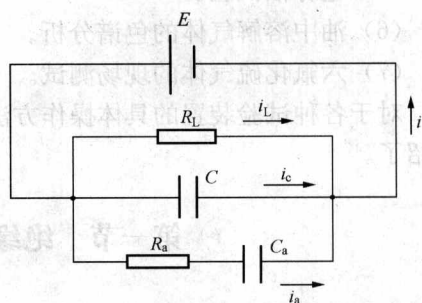


图 1-2 测绝缘电阻时的等值回路图

从图 1-1 可知,用初始电流和稳态电流之比可以表示绝缘的受潮程度,实用上用 60s 和 15s 时的绝缘电阻之比来表示,称为吸收比 (DAR)。当绝缘受潮时,泄漏电流 i_L 大,占总电流的比例也大, $R_{60''}$ 和 $R_{15''}$ 的数值就相接近,故比值接近于 1;当绝缘干燥时,泄漏电流就小,占总电流的比例也小, $R_{60''}$ 比 $R_{15''}$ 就大,故比值就大于 1,一般认为, $R_{60''}/R_{15''} \geq 1.3$

为干燥绝缘。而极化指数 (PI) 的原理和吸收比相似,所用的时间更长,即 $R_{10\min}/R_{1\min}$ 。当绝缘受潮或污染时,接近于 1;干燥时,PI 就大于 1。

测量绝缘电阻的仪表称为兆欧表。其型式有手摇式、晶体管式和数字电子式。其输出直流电压等级有 100、250、500、1000、2500、5000V,对于不同电压等级的电气设备应使用不同电压的兆欧表,最常用的是 500、1000V 和 2500V 等级的。数字电子式兆欧表在国外已得到较多的采用。

随着绝缘材料从 A、B 级发展为 F、H 级,交联聚乙烯电力电缆的广泛采用及电压等级的提高,国内外也都已生产出更为先进的兆欧表,如:我国的 GZ-5A 型 (2500/5000V) 兆欧表;日本的 PI-6000 测试器 (1000/6000V);美国的电子兆欧计 (5000V) 等。

三、影响因素和分析判断

1. 影响因素

影响绝缘电阻的因素很多,下面分列给予简述。

(1) 湿度影响。当空气的相对湿度增大时,绝缘物就容易受潮,从而使绝缘电阻降低。要求相对湿度小于 80%。

(2) 温度影响。当温度升高时,绝缘的电导增大而使绝缘电阻降低。温度的影响是很大的,为了进行比较必须对温度进行修正,对于不同的电气设备有不同的温度修正系数,并且有一定的误差。具体的修正系数将在下面各章中分别的说明。一般要求被试品及环境温度不低于 +5℃。

(3) 表面状态的影响。表面的污染、受潮使绝缘物的表面电阻率下降,从而使绝缘电阻也下降。

(4) 试验电压大小的影响。随着试验电压的增加,绝缘电阻会减少,对良好的干燥绝缘的影响较小。所以对于不同电压等级的电气设备应采用不同电压的兆欧表。

(5) 电气设备上剩余电荷的影响。剩余电荷的存在使被测数值会出现虚假现象 (增大或减小),所以在测试前应对被试设备进行充分的放电。

(6) 兆欧表容量的影响。兆欧表容量要求越大越好,推荐采用 1mA 及以上的兆欧表。

(7) 接线和表计型式的影响。对同一设备应采用同一型式的表计和接线方式,否则也会出现误判断。

2. 分析判断

(1) 绝缘电阻应该大于规定的允许值。对不同的电气设备和部件的绝缘电阻的允许值是不同的,这将在下面各具体的设备的章节中加以叙述。

(2) 应将测得的值和同一设备过去的的数据 (包括出厂数据),各相之间的数据,同类设备的数据进行比较。由于影响绝缘电阻的因素太多,在国内外都强调将“比较”作为分析判断的有力的措施。

(3) 在分析判断时,应充分地排除各种影响因素,如湿度、温度、表面污染等。

第二节 泄漏电流试验和直流耐压试验

一、概述

由于绝缘电阻测量的局限性,所以在绝缘试验中就出现了测量泄漏电流的项目。关于泄

漏电流(i_L)的概念在上节中已加以说明。测量泄漏电流所用的设备要比兆欧表复杂,一般用高压整流设备进行测试。由于试验电压高,所以就容易暴露绝缘本身的弱点,用微安表直测泄漏电流,这可以做到随时进行监视,灵敏度高。并且可以用电压和电流、电流和时间的关系曲线来判断绝缘的缺陷。因此,它属于非破坏性试验的方法。

在国外也将此种试验称为阶段直流电压试验。由于电压是分阶段地加到绝缘物上的,便可以对电压进行控制。当电压增加时,薄弱的绝缘将会出现较大的泄漏电流,也就是得到较低的绝缘电阻。

而直流耐压试验(在国外也称为直流高电位试验)是加到绝缘上的电压超过了电气设备的交流额定电压值,在最大电压下保持一段时间(如5min),它是在泄漏电流试验的基础上进行的。直流耐压试验往往可以发现一些交流耐压试验中不易发现的局部缺陷,如发电机的端部绝缘缺陷,同时还具有试验设备较轻便,没有极化损失,对绝缘的破坏比交流电压要小得多等特点,所以得到了广泛的使用。它是属于破坏性的试验。它和交流耐压试验是互补的,不能互相代替。而试验电压值对各种电气设备是不同的,详见下面各章所述。

二、试验原理

由上节所述,将直流电压加到绝缘上时,其泄漏电流是不衰减的,在加压到一定时间以后,微安表的读数就等于泄漏电流值。绝缘良好时,泄漏电流和电压的关系几乎呈一直线,且上升较小;绝缘受潮时,泄漏电流则上升较大;当绝缘有贯通性缺陷时,泄漏电流将猛增,和电压的关系就不是直线了。因此,通过泄漏电流和电压之间变化的关系曲线就可以对绝缘状态进行分析判断。在图1-3和图1-4中绘出了泄漏电流和电压及时间的关系曲线。

我国现已生产各种试验装置可供使用,图1-5给出了此种试验装置的原理接线。

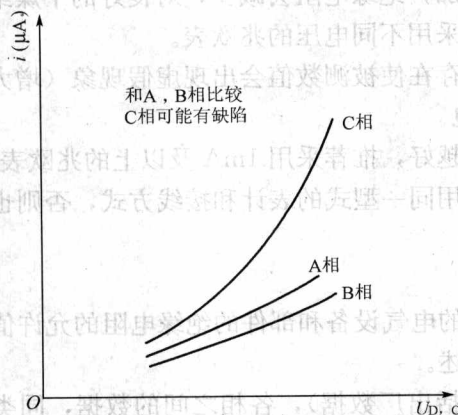


图 1-3 泄漏电流和电压的关系曲线

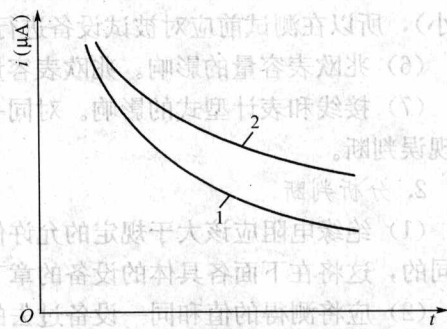


图 1-4 泄漏电流和时间的关系曲线

1—正常情况; 2—可能受潮或有缺陷

位置 I: 微安表处于高电位, 测量准确, 但微安表对地绝缘应良好。

位置 II: 微安表处于低电位, 读数方便, 但测量有误差。

位置 III: 微安表处于低电位, 读数方便, 测量准确, 但被试品下端不能直接接地, 这是优先采用的位置。

当要求产生较高的直流电压时, 可采用倍压整流和直流串级电路, 国产有 ZGS 系列和 ZGF 系列。

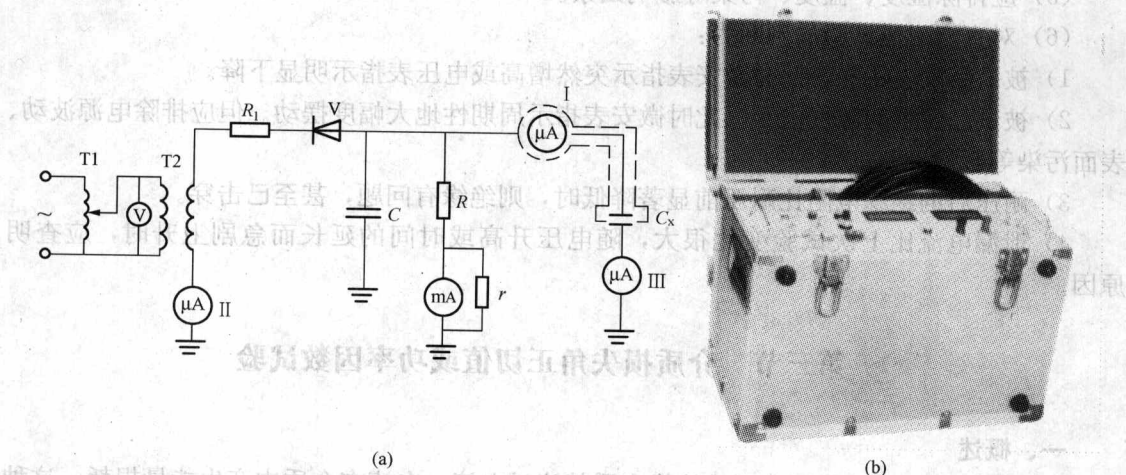


图 1-5 测量泄漏电流和直流耐压

(a) 试验接线图(半波整流); (b) SED-6012 型便携式高压试验器外形图

T1—自耦变压器; T2—升压变压器; V—高压整流硅堆; R₁—保护电阻; μA—微安表;C—稳压电容器; mA—测压用毫安表; R—测压用电阻; C_x—被试品; r—保护电阻

三、影响因素和分析判断

1. 影响因素

(1) 温度的影响。当温度升高时, 泄漏电流增大, 所以在《电力设备预防性试验规程》中规定发电机在停机后清除污秽前热状态下进行。处于备用状态时, 可在冷态下进行(应在 5℃ 以上进行)。

(2) 表面污染的影响。由于实测的泄漏电流应该是容积泄漏电流, 所以对被试设备的表面应进行清扫和干燥, 以消除表面泄漏电流的影响, 也可采用屏蔽环将表面泄漏电流短路而不流过微安表。

(3) 加压速度的影响。加压速度过快, 将影响吸收过程的完成, 对电容量大的设备就有影响。在《电力设备预防性试验规程》中规定试验电压按每级 $0.5u_n$ (u_n : 额定线电压) 分阶段升高, 每阶段停留 1min。

(4) 微安表位置和高压连线的影响。这主要是杂散电流和电晕电流的影响。应按制造厂说明书接线及加屏蔽。

(5) 试验电压波形和极性的影响。要求试验电压的电源波形是正弦波形(交流)。对油纸绝缘用负极性试验易于发现绝缘缺陷; 对少油断路器等泄漏电流较小的设备可采用正极性试验电压。按《电力设备预防性试验规程》要求, 一般情况下应采用负极性接线。

(6) 湿度影响。和绝缘电阻相似, 应在空气相对湿度 80% 以下进行。

2. 分析判断

(1) 泄漏电流随电压不成比例显著增长时, 应注意分析。

(2) 泄漏电流应不随时间的延长而增长。

(3) 所测得的泄漏电流值不应超出一般允许值(可见下述各章)。

(4) 将数值与过去数据、各相间和同类设备相比较。

(5) 应排除湿度、温度、污染等影响因素。

(6) 对直流耐压试验的判断为:

1) 被试品发生击穿。此时微安表指示突然增高或电压表指示明显下降。

2) 被试品发生间隙性击穿。此时微安表指示周期性地大幅度摆动。但应排除电源波动、表面污染等影响。

3) 耐压后的绝缘电阻比耐压前显著降低时, 则绝缘有问题, 甚至已击穿。

4) 泄漏电流比上次试验变化很大, 随电压升高或时间的延长而急剧上升时, 应查明原因。

第三节 介质损失角正切值或功率因数试验

一、概述

在外加交流电压的作用之下, 绝缘介质就流过电流, 电流在介质中产生能量损耗, 这种损耗称为介质损耗。介质损耗很大时, 就会使介质的温度升高而老化, 甚至导致热击穿。因此, 介质损耗的大小就反映了介质的优劣状况。

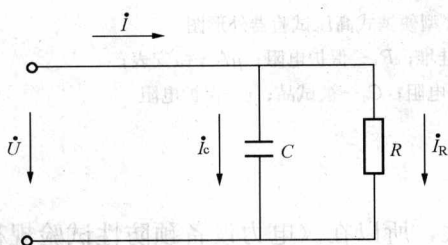


图 1-6 介质等值电路

为什么用测量介质损耗角正切值或功率因数的方法(在国外多称为功率因数试验)可以用于评定绝缘的介电性能呢? 下面我们从机理上进行解释。

当绝缘物上加交流电压时, 我们可以把介质看成为一个电阻和电容并联组成的等值电路, 如图 1-6 所示。

根据等值电路可以作出电流和电压的相量图, 如图 1-7 所示。

由相量图可知, 介质损耗由 I_R 产生, 夹角 δ 大时, I_R 就大, 故称 δ 为介质损失角, 其正切值为

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_c} = \frac{U/R}{U\omega C} = \frac{1}{\omega CR}$$

$$\text{介质损耗} \quad P = \frac{U^2}{R} = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

由上式可见, 当 U 、 f 、 C 一定时, P 正比于 $\operatorname{tg} \delta$, 所以可用 $\operatorname{tg} \delta$ 来表征介质损耗。

在国外也有使用功率因数 $\cos \varphi$ 来表征介质损耗 P , 实际上在 $\operatorname{tg} \delta$ 和 $\cos \varphi$ 小于 10% 时, $\operatorname{tg} \delta \approx \cos \varphi$, 这可由下式得到

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{I_R}{\sqrt{I_R^2 + I_c^2}} = \frac{I_R}{I_R \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \delta}\right)^2}} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \delta + 1}}$$

由于 δ 很小, 则 $\operatorname{tg}^2 \delta$ 可忽略不计, $\cos \varphi \approx \operatorname{tg} \delta$ 。

测量 $\operatorname{tg} \delta$ (或 $\cos \varphi$) 的灵敏度较高, 可以发现绝缘的整体受潮、劣化变质及小体积设备的局部缺陷。这种方法已得到了广泛的应用。

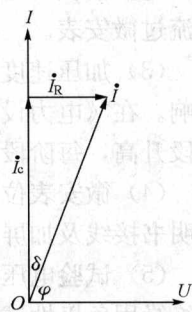


图 1-7 等值电路电流、电压相量图

二、原理

由上节可知,当绝缘受潮、老化时,有功电流 I_R 将增大, $\text{tg}\delta$ 也增大。通过测 $\text{tg}\delta$ 可以反映出绝缘的分布性缺陷。如果缺陷是集中性的,有时测 $\text{tg}\delta$ 就不很灵敏,这是因为集中性缺陷为局部的,我们可以把介质分为有缺陷和无缺陷的两部分:无缺陷的部分为 R_1 和 C_1 的并联;有缺陷部分为 R_2 和 C_2 的并联。则

$$P = P_1 + P_2$$

$$\omega C U^2 \text{tg}\delta = \omega C_1 U^2 \text{tg}\delta_1 + \omega C_2 U^2 \text{tg}\delta_2$$

$$\text{tg}\delta = \frac{C_1}{C} \text{tg}\delta_1 + \frac{C_2}{C} \text{tg}\delta_2$$

当有缺陷部分占的比例很小时, $C \gg C_2$, $\frac{C_2}{C} \text{tg}\delta_2$ 就很小,所以测整体的 $\text{tg}\delta$ 时就不易发现局部缺陷。

在《电力设备预防性试验规程》中对电机、电缆等绝缘,因为缺陷的集中性及体积较大,通常不做此项试验;而对套管、电力变压器、互感器、电容器等则做此项试验。

我国目前使用的测 $\text{tg}\delta$ 试验装置有西林电桥(图 1-8 给出了 QS1 西林电桥的三种试验接线),M 型介质试验器,还有 P5026M 型交流电桥、GWS-1 型光导微机介质损耗测试仪等,具体的使用方法可参见制造厂说明书。

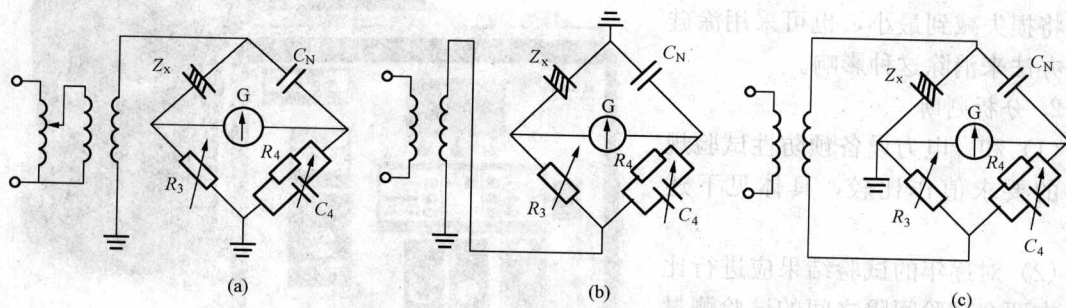


图 1-8 QS1 型西林电桥原理接线

(a) 正接线; (b) 反接线; (c) 对角线接线

Z_x —被测绝缘阻抗; C_N —标准电容; R_3 —可变电阻; C_4 —可变电容; G —检流计

在国外,还使用 Biddle 型功率因数试验装置,型号为 Delta 2000 型,图 1-9 和图 1-10 分别表示了其简化回路图和外形图。这是一种利用微机技术制造的自动平衡的试验装置,其主要特点是:

- (1) 有完整的配套设备。包括 0~12kV 电源、标准电容、仪表试验端子和打印机。
- (2) 操作简便。提供自动平衡和信号显示,包括电压、电流、介质损耗 (W)、电容和功率因素。读数可调整到 10kV 或 2.5kV 的有效值。

(3) 读数可以在打印机上硬拷贝,或用可移动“数据键”它用于在以后移到标准 PC 机上。

(4) 安全。包括两个手动联锁开关、接地断开探测回路和试验的零电压起始引入。

(5) 在强烈的电子和电磁干扰条件下,可达到高的精确度,例如在高压变电所就有这种情况。

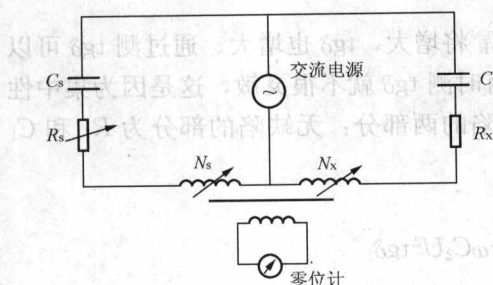


图 1-9 Biddle 功率因数 (PF)

装置简化回路图

C_s —标准参考电容; C_x —被试绝缘电容; R_s —可变电阻 (平衡电阻电流); R_x —被试绝缘电阻;
 N_s 、 N_x —专用可调变压器 (平衡电容电流)
零位计, 电桥平衡时为零

(6) 设有自诊断的自查刻度。

图 1-8 (a) 正接线用于两极对地绝缘的设备, 用于实验室或绕组间测 $\text{tg}\delta$ 。图 1-8 (b) 反接线用于现场被试设备为一极接地的设备, 要求电桥有足够的绝缘。图 1-8 (c) 对角线接线用于被试设备为一极接地的设备且电桥没有足够的绝缘。

三、影响因素和分析判断

1. 影响因素

(1) 温度的影响。 $\text{tg}\delta$ 值受温度影响而变化, 为了比较试验结果, 对同一设备在不同温度下的变化必须将结果归算到一个公共的基准温度, 一般归算到 20°C 。关于温度的修正系数具体见下述各章。

(2) 湿度的影响。在不同的湿度下测得的值也是有差别的, 应在空气相对湿度小于 80% 下进行试验。

(3) 绝缘的清洁度和表面泄漏电流的影响。这可以用清洁和干燥外表面来将损失减到最小, 也可采用涂硅油等办法来消除这种影响。

2. 分析判断

(1) 和《电力设备预防性试验规程》的要求值作比较, 具体见下述各章。

(2) 对逐年的试验结果应进行比较, 在两个试验间隔之间的试验测量值不应该有显著的增加或降低。

(3) 当 $\text{tg}\delta$ 值未超过规定值时, 可以补充测电容量来分析, 电容量不应该有明显的变化。

(4) 应充分考虑温度等的影响, 并进行修正。

(5) 通过测 $\text{tg}\delta=f(U)$ 的曲线, 观察 $\text{tg}\delta$ 是否随电压而上升, 来判断绝缘内部是否有分层、裂纹等缺陷。

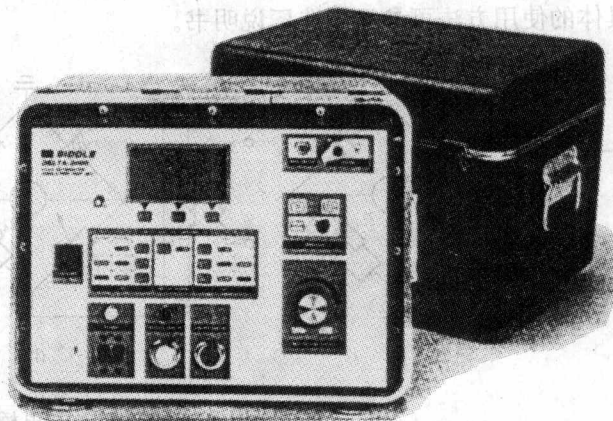


图 1-10 Delta2000 型试验装置外形图

第四节 交流耐压试验

一、概述

交流耐压试验是对电气设备绝缘外加交流试验电压, 该试验电压比设备的额定工作电压要高, 并持续一定的时间 (一般为 1min)。交流耐压试验是一种最符合电气设备的实际运行条件的试验, 是避免发生绝缘事故的一项重要的手段。因此, 交流耐压试验是各项绝缘试验