



电气设备绝缘 在线监测

余成波 陈学军 雷绍兰 王士彬 编著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



电气设备绝缘 在线监测

余成波 陈学军 雷绍兰 王士彬 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

电气设备绝缘在线监测是当前电力行业最具活力的技术领域之一。本书是作者多年来讲授“电气设备在线监测”及相关课程以及长期从事电气设备绝缘状态的在线监测研究的工作经验总结,介绍了相关的在线监测的原理和技术。本书主要内容包括电气设备中固态、液态和气态绝缘材料的电性质;电气设备绝缘状态的在线监测的系统构成;电气设备绝缘材料各状态参量在线监测的原理和方法。

本书注重从系统的角度描述电气设备绝缘状态在线监测的基本原理和实现方法,注重知识体系的全局性、完整性,注重基本概念的阐述和基本原理的分析。适合作为高等学校电气工程类专业课程的教学用书,也可作为电力行业相关技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电气设备绝缘在线监测/余成波等编著. —北京:清华大学出版社,2013

21世纪高等学校规划教材·电子信息

ISBN 978-7-302-33134-6

I. ①电… II. ①余… III. ①电… IV. ①TM505

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第158589号



责任编辑:魏江江 薛 阳

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁 毅

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印刷者:北京富博印刷有限公司

装订者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:18.5

字 数:464千字

版 次:2014年1月第1版

印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:34.00元

产品编号:037096-01

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

- (1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。
- (2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。
- (3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。
- (4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。
- (5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。
- (6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。
- (7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。
- (8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail:weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

对电力设备进行在线监测是实现设备故障诊断、预知性维修的前提,是保证设备安全可靠运行的关键,也是对传统的离线预防性试验的重大补充和拓展。近几十年来,在线监测技术在世界各国得到了迅速发展和广泛应用。国内出版了多部相关的教材和著作,对于普及和推动我国电气设备状态监测技术起到重要作用,特别是对高等学校电气工程专业的教学和研究发挥了积极作用。为了适应本技术的发展需要,作者在多年讲授“电气设备在线监测”及相关课程以及长期从事电气设备绝缘状态的在线监测研究工作的基础上,编写了本教材。

本教材从较为新颖的角度介绍了电气设备绝缘状态在线监测的知识体系,首先介绍了电气设备绝缘状态在线监测的理论基础,分别对固态、液态和气态绝缘材料在电作用下的微观和宏观表现进行阐述;其次介绍电气设备状态在线监测的系统构成,并描述在线监测系统的组成模块及各模块的功能;最后介绍电气设备绝缘材料各状态参量在线监测的原理和方法,即对局部放电、泄漏电流、介质损耗角正切值以及电阻和温度等状态参量的监测原理和方法进行详细介绍。

本教材在编写过程中遵循以下原则。

1. 知识体系创新

本书创新了电气设备绝缘状态在线监测教材的内容体系,提出了从原理到系统构成到实现方法的知识结构,有利于电气工程大类学生对于该专业课程内容的吸纳,以及相关专业教师在教学活动中使用。

2. 理论联系实际

本书将电气绝缘的理论与电气设备绝缘状态的在线监测技术联系起来,将电气设备绝缘状态的在线监测技术与相应的工程实例联系起来,有利于学生从系统的角度,从实用化的角度理解和掌握该专业课程。

3. 内容更加全面

本书针对电气设备绝缘的各种相关状态参量的在线监测技术和实现方法进行较为完备的归纳、综述,适当引入该领域中的新方法和新成果,有助于读者从宏观上把握技术发展的方向和趋势,并在分析现有技术成果的基础上对未来的发展进行判断。

4. 面向教学

本书从教学活动的实际要求出发,一方面从系统和应用的角度,提出相对完备而合理的知识体系;另一方面是注重对于基本概念和基本原理的透彻讲解和分析。本书提供了电子课件和相关教学资料。

本教材的特点是:注重从系统的角度描述电气设备绝缘状态在线监测的基本原理和实

现方法,注重知识体系的全局性、完整性,注重基本概念的阐述和基本原理的分析。适合作为高等学校电气工程大类专业课程的教学用书,也可作为电力行业相关技术人员的参考用书。

本书作者的研究工作得到了国家科技型中小企业技术创新基金项目(No. 09C26225115524)、重庆市科技攻关计划项目(No. CSTC2011AC2179)、重庆市科学技术委员会自然科学基金重点项目(No. CSTC2007BA2023, No. CSTC2007BA3001)、重庆市科学技术委员会自然科学基金项目(No. CSTC2005BB2077)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(No. KJ070605, No. KJ060613)等的资助,在此表示谢意!

本书由余成波负责全书的统稿和审校。其中,第1、2章,第5章和第8章由雷绍兰负责;第3、4章,第6、7章和第9、10章由陈学军负责;绪论和第11~14章由王士彬、余斐负责。参加各章节编写的还有李彦林、李洪兵、熊飞、唐海燕、余磊、谭俊、李芮、何强、刘天宝、曾一致、晏绍奎、田引黎、赵西超、代琪怡、肖丹、杨翼驹、柯艳红、王帅等。

本书在编写过程中参考了大量文献和资料,在此对原作者深表感谢,恕不一一列举。同时,本书在编写过程中得到了众多高等学校、科研单位、厂矿企业等的大力支持和帮助,并获得了许多宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢。

本书内容全面而实用,适用面广,不仅适合作为高等学校电气工程大类专业课程的教学用书,也可作为电力行业相关技术人员的参考用书。

热忱地期望各位读者和同仁对本书中的疏漏和不足提出指正和建议。

编著者

2013年2月

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 电气设备绝缘预防性试验的重要性	1
0.2 绝缘预防性试验的回顾和不足	2
0.3 电气设备在线监测和状态维修的必要性和意义	4
0.4 电气设备在线监测技术的国内外发展概况及趋势	6
第 1 章 绝缘材料的基本概念	8
1.1 绝缘材料的概念及性能	8
1.1.1 绝缘材料的定义	8
1.1.2 绝缘材料的特性	8
1.1.3 绝缘材料的主要性能指标	10
1.1.4 绝缘材料的耐热等级	10
1.2 固体绝缘材料	11
1.2.1 固态绝缘材料的分类	11
1.2.2 缺陷状态下的固态绝缘材料	13
1.3 液体绝缘材料	14
1.3.1 液体绝缘材料类型及特性	14
1.3.2 污染后的液态绝缘材料	15
1.3.3 提高液体绝缘材料绝缘的主要措施	17
1.4 气体绝缘材料	17
1.4.1 气体绝缘材料的类型及特性	17
1.4.2 空气	18
1.4.3 六氟化硫	18
1.4.4 氮气	19
第 2 章 电介质的老化和击穿	20
2.1 电介质老化及其类型	20
2.1.1 概述	20
2.1.2 电介质老化的类型	21
2.1.3 固体电介质的老化	22

2.1.4	液体电介质的老化	25
2.1.5	电介质老化试验	26
2.2	电介质的击穿及其类型	31
2.2.1	概述	31
2.2.2	气体电介质的击穿	31
2.2.3	液体电介质的击穿	37
2.2.4	固体电介质的击穿	40
第3章	在线监测系统	43
3.1	系统组成及分类	43
3.1.1	系统的组成	43
3.1.2	系统的分类	44
3.2	变电站在线监测系统	48
3.2.1	变电站主要设备的在线监测	49
3.2.2	变电站其他监测系统	52
第4章	传感器	55
4.1	温度传感器	55
4.1.1	热敏传感器	55
4.1.2	数字温度传感器	59
4.1.3	红外温度传感器	62
4.1.4	光纤温度传感器	64
4.2	湿度传感器	70
4.2.1	湿度的定义	70
4.2.2	湿度传感器的分类	71
4.2.3	湿度传感器的应用	74
4.2.4	湿度传感器的发展方向	75
4.3	电流传感器	75
4.3.1	互感器型电流传感器	75
4.3.2	霍尔电流传感器	76
4.3.3	光电式电流传感器	77
4.4	电压传感器	77
4.4.1	电阻式电压传感器	78
4.4.2	电容分压式电压互感器	78
4.4.3	电磁感应式电压互感器	78
4.5	振动传感器	79
4.5.1	振动传感器的力学原理	79
4.5.2	振动传感器分类	80
4.6	超声传感器	81

4.6.1	超声波特性	81
4.6.2	超声波传感器	83
4.7	超高频传感器	85
4.7.1	天线接收原理	85
4.7.2	超高频传感器的设计原则	87
4.8	光敏传感器	88
第5章	电磁兼容及其抗干扰技术	89
5.1	电磁兼容概述	89
5.1.1	电磁兼容的定义	89
5.1.2	电磁兼容主要技术术语	89
5.1.3	电磁干扰的三要素	90
5.1.4	电磁干扰的危害	92
5.2	电磁干扰抑制措施	93
5.2.1	滤波技术	93
5.2.2	屏蔽技术	97
5.2.3	接地技术	99
5.3	电力系统的电磁兼容技术	102
5.3.1	电力系统中电磁干扰的三要素	102
5.3.2	电力系统的电磁兼容问题	103
第6章	局部放电在线监测	106
6.1	局部放电特征	106
6.1.1	局部放电机理	106
6.1.2	局部放电特征	108
6.2	局部放电在线监测的系统要求	111
6.2.1	硬件	111
6.2.2	软件	112
6.2.3	抗干扰	113
6.3	局部放电分析及模式识别	114
6.3.1	局部放电分析	114
6.3.2	局部放电模式识别系统	115
6.3.3	模式识别方法	116
6.3.4	模式识别的应用	117
6.4	局部放电定位	118
6.4.1	电气定位法	118
6.4.2	超声定位法	120
6.4.3	光定位	121
6.4.4	热定位	121



6.4.5	超高频定位	122
6.5	220kV/600kVA 电力变压器局部放电在线监测系统	122
第 7 章	介质损耗角正切值的在线监测	127
7.1	介损的参量特征	127
7.1.1	电介质的极化现象	127
7.1.2	电介质的极化类型	127
7.1.3	电介质极化的意义	129
7.1.4	电介质损耗及介质损耗角正切	129
7.2	介损在线监测的系统要求	130
7.2.1	电场干扰对介损测试结果的影响	130
7.2.2	介质损耗测量时电场干扰的抑制	131
7.3	介损的在线测量方法	133
7.3.1	测量原理	133
7.3.2	介损测试电桥	134
7.4	220kV 电流互感器介损的在线监测系统	137
7.4.1	基本概念	137
7.4.2	正立式电容型电流互感器介质损耗因数及电容量测量	140
第 8 章	泄漏电流的在线监测	141
8.1	泄漏电流的参量特征	141
8.1.1	泄漏电流的定义	141
8.1.2	表征污秽绝缘子的特征量	142
8.2	泄漏电流在线监测的系统要求	143
8.2.1	硬件要求	143
8.2.2	软件要求	144
8.3	泄漏电流的在线测量方法	144
8.3.1	绝缘子污秽在线监测	144
8.3.2	氧化锌避雷器在线监测	146
第 9 章	特殊气体的在线监测	156
9.1	油中气体的产生机理	156
9.1.1	油劣化及气体产生	156
9.1.2	固体绝缘材料的分解及气体	157
9.1.3	气体的其他来源	157
9.2	油中溶解气体分析与检测	158
9.2.1	油气分离技术	158
9.2.2	混合气体检测技术	159
9.2.3	在线监测产品	160

9.3	变压器油色谱在线监测系统	160
9.3.1	气相色谱法的原理	160
9.3.2	在线监测系统	161
9.4	变压器油中溶解气体在线监测与故障诊断	164
9.4.1	溶解气体	164
9.4.2	故障诊断	165
9.4.3	应用意义	175
9.5	SF ₆ 气体参量的在线监测	176
9.5.1	SF ₆ 气体	176
9.5.2	SF ₆ 测试技术	176
9.5.3	在线监测系统	177
第 10 章	微水的在线监测	179
10.1	微水的来源及危害	179
10.1.1	变压器油中的微水	179
10.1.2	SF ₆ 中的微水	181
10.2	微水的监测方法	182
10.2.1	变压器油中含水量的测量方法	182
10.2.2	纸绝缘含水量测量方法	183
10.2.3	SF ₆ 含水量测量方法	184
10.3	变压器油微水在线监测系统	185
10.3.1	基本原理	185
10.3.2	湿度传感器及安装	186
10.3.3	在线监测系统	187
10.3.4	在线监测系统应用产品案例	188
第 11 章	温度的在线监测	192
11.1	温度监测的方法	192
11.1.1	接触式测量	192
11.1.2	非接触式测温	196
11.2	温度监测系统的要求	198
11.2.1	多通道温度巡回检测系统	198
11.2.2	智能化温度检测系统	199
11.3	600MW 发电机定子温度在线监测系统	201
11.3.1	监测系统的工作原理	201
11.3.2	系统的整体结构	202
第 12 章	电阻及阻抗的在线监测	213
12.1	直流电阻	213

12.1.1	直流电阻的定义	213
12.1.2	直流电阻检测	213
12.2	绝缘电阻	218
12.2.1	绝缘电阻的定义	218
12.2.2	绝缘电阻测量	219
12.3	接地电阻	223
12.3.1	接地电阻的定义	223
12.3.2	接地电阻测量的基本原理	224
12.3.3	接地阻抗测量方法	225
12.4	接触电阻	226
12.4.1	接触电阻的定义及形成原理	226
12.4.2	接触电阻测试原理	227
12.4.3	影响接触电阻的因素	228
12.4.4	接触电阻的问题研讨	229
12.5	短路阻抗	230
12.5.1	短路阻抗的定义	230
12.5.2	变压器短路阻抗与绕组结构的关系	231
12.5.3	造成短路的主要原因	231
12.5.4	短路阻抗的测量方法	232
12.5.5	测量仪器的选择	234
12.6	交流阻抗	235
12.6.1	交流阻抗的定义	235
12.6.2	交流输出阻抗的测试	235
12.7	10kV 电力电缆绝缘电阻在线监测系统	238
12.7.1	差频法在线监测技术原理及方法	238
12.7.2	两正弦电压叠加的超低频调幅特性分析	239

第 13 章 电容型设备的在线监测 241

13.1	概述	241
13.2	常规在线检测方法	242
13.2.1	电桥法	242
13.2.2	电压电流表法	243
13.2.3	双电压表法	244
13.2.4	数字电容表法	244
13.3	三相电容型设备不平衡信号的在线检测	244
13.3.1	几个绝缘特性参数分析	244
13.3.2	三相电流之和的在线检测工作原理	246
13.3.3	中性点不平衡的电压在线检测	248
13.4	电容型电流互感器的在线监测系统	248

13.4.1	谐波分析法原理及检测系统结构	249
13.4.2	AD7656 性能及主控芯片	250
13.4.3	硬件电路设计	250
13.4.4	软件设计	253
第 14 章	其他相关参量的在线监测	254
14.1	振动	254
14.1.1	旋转机械振动监测和分析	254
14.1.2	变压器振动监测和分析	262
14.1.3	大跨越导线测振及监测技术	265
14.2	紫外光	269
14.2.1	方法原理	269
14.2.2	紫外验电仪	270
14.2.3	试验与结果分析	271
14.3	光声光谱	272
14.3.1	光声光谱技术的物理机制	273
14.3.2	气体中的光声效应	274
14.3.3	光声光谱技术在电气设备 SF ₆ 气体检测中的应用	275
参考文献	279

0.1 电气设备绝缘预防性试验的重要性

高压电气设备主要是由两类不同材料构成的：一类为金属材料，包括铜、铝等导电材料，硅钢片等导磁材料，铸铁、钢板等外壳或结构材料；另一类为绝缘材料，如绝缘纸（及纸筒、纸板）、塑料薄膜、层压板（及筒）、电瓷、绝缘油等。相对于金属材料而言，绝缘材料容易损坏，特别是有机绝缘材料，如绝缘纸、塑料、绝缘漆或胶等，很容易老化变质而使机电强度显著降低。因而绝缘结构的机电性能的好坏往往成为决定整个电气设备寿命的关键所在。例如，对 110kV 及以上的电力变压器的 93 次事故原因分析，其中由于匝绝缘、引线及对地绝缘、套管绝缘引起的各事故约占 43%、23%、15%；而铁心、分接开关等非绝缘事故仅占 20% 以下。

因此，高压电气设备不仅在出厂前，应按有关标准进行严格而又合理的试验（型式试验及例行试验）；而且在投运前也要进行交接试验，在运行过程中要定期进行预防性试验，这样才能较好地保证该设备的安全运行。

关于预防性试验的项目，我国已经积累了一套比较成熟的试验内容，对于各类设备，现行的预防性试验内容可大致归纳为如表 0-1 所示。

表 0-1 我国现行的绝缘预防性试验项目的主要内容

设备名称 是否试验 试验项目	电力变压器	电力电缆	高压套管	断路器		发电机
				充 SF ₆	充 油	
1. 测量绝缘电阻 R_i	√	√	√	√	√	√
2. 测量直流泄漏电流 I_1	√	√	—	√	√	√
3. 直流耐压试验	—	√	—	—	—	√
4. 测量介质损耗角正切值 $\text{tg}\delta$	√	√	√	○	√	○
5. 绝缘油试验	√	√	●	—	√	√
6. 微量水分测定	◎	—	●	√	—	—
7. 油中溶解气体色谱分析	◎	—	●	—	—	—
8. 局部放电试验	—	—	●	—	—	—
9. 交流耐压试验	○	—	○	○	√	○

注：“√”进行；“—”不进行；“◎”仅电压高或容量大时进行；“●”必要时进行；“○”大修后进行。

可见那些非破坏性试验项目，如测量绝缘电阻 R_i 、测量介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ 、测量直流高压下的泄漏电流 I_1 等，几乎被广泛用作各种高压电气设备的预防性试验项目；而像交流耐

压那样的可能引起残余破坏的破坏性试验项目,仅在必要时、大修后等情况下才进行,而且要在非破坏性试验项目通过后才可进行。

0.2 绝缘预防性试验的回顾和不足

根据过去长期的运行经验及试验研究中已逐步确立起来的这些预防性试验项目,为确保电气设备的安全运行曾发挥过很大作用;而且当时确实考虑了如何采用简便而又有效的方法来估计设备的绝缘状况。

例如,当绝缘总体受潮或严重损坏时,往往引起绝缘电阻 R_i 的下降或直流泄漏电流 I_1 的上升。而采用兆欧表是一种最简便的测量高电阻的方法,兆欧表常采用流比计原理——电流及电压线圈安装在同一转轴上,当通电流后两者产生的转矩正好反向。这样巧妙的布置减少了由于电压波动等引起的电阻测值的波动,方便易行,深受用户欢迎。

如果感到兆欧表的直流电压太低(一般为 1kV 或 2.5kV),还可采用加以直流高压来测量泄漏电流 I_1 。便于观察随着外施电压的上升, I_1 是否也基本按比例上升。因为当存在有某些缺陷时,高压直流下的绝缘电阻(由泄漏电流换算而得) R_i 往往比低压下用兆欧表测得的小得多。

由于测到的绝缘电阻 R_i 或泄漏电流 I_1 ,与被试品的绝缘尺寸(电极间的绝缘距离、截面等)紧密相关,因此在绝缘试验时应对这些数据进行“纵比”——与同一设备过去的测量数据作比较,或“横比”——与同类被试品进行互相对比(例如求取三相不平衡系数等),才能作出比较正确的分析。在预防性试验时,对绝缘电阻测量时要求测其吸收比($R_{60'}/R_{15'}$)或弱点比($R_{10'}/R_{1'}$),也正是为了消除因绝缘尺寸不同带来的影响,而改以观察同一被试品在吸收过程中的相对变化。采用这些简便易行的方法在确定被试品是否存在普遍受潮等缺陷方面已起到了很好的作用。

然而,当前大量使用的是交流高压电气设备,在测绝缘电阻 R_i 或泄漏电流 I_1 时所加的是直流电压,其等效性如何?以串联介质组成的绝缘结构为例,一般情况下加交流时其电位分布是按该串联层的电容大小呈反比分布,而在稳态直流时,是按电阻大小呈正比分布,显然两者会有很大差异;而且施加同样幅值的直流高压或交流高压,绝缘中的损耗、局部放电过程,在交流下都比直流下严重得多。因此在交流高压下运行的设备最好仍测量其交流下的参数变化,这显然更真实些。当然如进行提高电压的交流耐压试验,会更加严格,但对由油纸绝缘材料构成的绝缘结构所带来的残余损伤也将比直流高压试验时严重得多。

在被试品的电容量很大的情况下,如电力电缆、发电机绝缘,当用直流耐压试验时试验设备容量可以小得多;而且外施直流试验时又易于发现高压旋转电机端部的缺陷,因此过去在预防性试验中直流耐压的方法仍相当广泛地被采用(如表 0-1 中项目 3 所示)。

用西林电桥法来测量交流下的介质损耗因数 $\text{tg}\delta$,是一种很有价值的试验方法。首先,测到的真正是反映交流下损耗大小的特征参数,即它与绝缘的几何尺寸无关,便于直接由此来判断绝缘的介质损耗(上述测到的 R_i 及 I_1 ,均与绝缘尺寸有关)。其次,对于高压电气设备的结构而言,总的介质损耗功率相对于此绝缘的无功功率总是只占一个很小的比例,如仍用瓦特计往往难以得到准确的测值,采用电桥原理,就可方便地调节电桥上的电阻、电容而使电桥平衡,从而读得较准确的 C_x 及 $\text{tg}\delta$ 。

对于油浸电力设备,测量绝缘油的击穿场强、水分、酸值等也是相当有意义的。因为在油-纸(或塑料)组合绝缘中,如仅仅是油质受潮,那一般在经过换油或干燥处理后,绝缘性能很快可以恢复。例如,久置不用的油浸电力变压器有可能受潮,如要重新启用时,不宜马上经耐压试验,而是先做非破坏性试验;若只是受潮,干燥后性能就可恢复。

气相色谱分析方法的引入,在发现油浸设备潜伏性故障的灵敏度方面往往比测量绝缘电阻及 $\text{tg}\delta$ 等高得多,因此正在修订中的预防性试验规程中准备将它列为对电力变压器绝缘预试项目中的首位。虽然各国在油中溶解气体的判断标准上有些差异,但都在实践中发挥了很好的作用。实际上,我国地域辽阔、各地运行条件不同,各制造厂所用的材料、工艺也有差异,色谱等的判断标准也宜因地制宜。前几年,通过调查研究,国内对色谱判断标准提出了相应的“注意值”。与其他的预防性试验的判据一样,今后仍然需要进一步积累运行经验,特别是事故前各次预防性试验的数据及其发展过程,都极有实用价值。

另外,当前运行的高压电气设备中大量采用了油-纸(塑料)组合绝缘。这些有机绝缘材料的寿命曲线相当陡峭:即它在短暂的高场强下绝缘强度极高;而在交流电压的长期作用下,材料逐渐劣化,其长时击穿场强仅为其短时的百分之几。在这里,因局部放电所伴随而来的电、热、机械、化学方面的作用,对有机绝缘的老化(不可逆变化)起了决定性作用。但其表现形式是多样化的:如油浸变压器中的围屏放电、电力电容器的膨胀破裂、塑料挤压成形的电缆中的树枝状放电等。因而对高压电气设备进行局部放电试验不仅要在制造厂里进行,而且逐渐发展到也在运行现场进行。但在变电所,外界干扰强,要从中分辨出被试品中较微弱的局部放电信号相当困难。

我国现行的绝缘预防性试验方法的主要项目如表 0-1 所示:在停电以后,主要是测量直流下的绝缘电阻 R_i 或泄漏电流 I_1 ,测量交流下的介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ 等。对于油浸电气设备要取油样进行绝缘油试验,容量大或电压等级高的电气设备还要进行油中气体的色谱分析等,然后对该设备的绝缘状况作出综合判断。今后必将陆续有新的、有效的方法补充进去。

过去进行的预防性试验的方法及经验是前人多年工作的总结,它已经发挥过不少积极作用;但近年来越来越多的电力工作者从实践中意识到,过去的试验项目如今效果欠佳,例如,一台 220kV 油纸电容式电流互感器,在停电预试时,按规程加 10kV 电压,测出 $\text{tg}\delta$ 为 1.4%,小于规程规定的指标 1.5%,但投运后就爆炸了。人们最关心的是绝缘结构的残余电气强度,但至今还未找到它与绝缘电阻 R_i 、泄漏电流 I_1 及介质损耗因数 $\text{tg}\delta$ 等非破坏性试验参数之间的直接函数关系。

这是因为所测得的绝缘参数往往是反映整体绝缘性能的宏观参数,而在多条并联通道中只要有一条贯穿通道的绝缘强度下降,就足以导致整个电气设备出现故障。

近年来,在可能的情况下尽量进行“分解试验”:例如,将有小套管引出的电容式套管与变压器本体分开来测试,对断路器进行大修时将灭弧室等一一分开来试验等。对难以分解的,采用多端测量的方法,例如,对三绕组变压器,就宜用几种不同的接线方式测量后,分辨出缺陷在哪一部分。

另外,由于停电后进行非破坏性的预防性试验时,按现行规程规定,所加的交流试验电压一般不超过 10kV;如再要加高试验电压来测 $\text{tg}\delta$,所用的标准电容器以及当用反接法测量时所用的电桥的绝缘必须另行加强。现行的变电设备中有很大部分的运行相电压为