

电力变压器技术丛书

BIANYAQI SHIYAN JISHU

变压器试验技术

保定天威保变电气股份有限公司 组编

主 编 胡启凡



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力变压器技术丛书

变压器试验技术

保定天威保变电气股份有限公司 组编

主 编 胡启凡

主 审 王赞基

参 编 胡启凡 王雪刚 李金芳
谢毓城 张喜乐 高中纪



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

近年来变压器试验技术发展很快,试验设备和测试仪器不断更新,本书给予了一定篇幅的介绍,同时结合国家标准的修订,介绍了当前国内外变压器试验和试验装备的最新技术。本书力求理论联系实际,既考虑到实际使用,又进行相应的理论分析。为了便于读者对各章内容的理解和掌握,在每章结尾部分均通过实例加以说明。

本书适用于广大从事变压器试验等的工程技术人员使用,也可作为高等院校师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

变压器试验技术 / 胡启凡主编; 保定天威保变电气股份有限公司组编. —北京: 中国电力出版社, 2009

(电力变压器技术丛书)

ISBN 978-7-5083-9503-6

I. 变… II. ①胡…②保… III. 变压器—试验 IV. TM406

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 174981 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>

策划: 周 娟

责任编辑: 齐 伟 责任印制: 陈焊彬 责任校对: 付珊珊

北京盛通印刷股份有限公司印刷·各地新华书店经售

2010 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·34 印张·844 千字

定价: 68.00 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

本社购书热线电话 (010-88386685)

编委会名单

朱英浩——工程院院士，沈阳工业大学教授，原沈阳变压器研究所总工程师

付锡年——武汉高压研究院副总工程师

王赞基——清华大学教授，科研院常务副院长，博士生导师，原电机系主任

尹克宁——西安交通大学教授，博士生导师

胡启凡——教授级高工，天威保变原总工程师

张喜乐——教授级高工，天威保变总工程师

刘玉仙——教授级高工，天威保变原总工程师

张元录——教授级高工，天威保变副总工程师

谢毓城——教授级高工，天威保变副总工程师

赵静月——教授级高工，天威保变总工艺师

前 言

随着我国输变电的发展,变压器产品的电压等级和变压器单台容量也在不断提高。为了适应生产的发展,有关标准和导则已有重要的修改与补充,如 GB 1094 变压器标准,已做了很多修订,声级测量的声强法已列入标准;变压器测试技术也同时有了很大进步;最近几年有关变压器测试的标准也在不断更新,JB 501—1991《电力变压器试验导则》也更新为 JB 501—2006,变压器性能标准 GB/T 6451—2008 综合了原 GB/T 6451—1999 和 GB/T 16274—1996 的变压器性能标准,新标准包括了 500kV 变压器的性能指标,750kV 变压器单独列出了新的标准 JB/T 10780—2007。此外,我国 1000kV 特高压示范工程已经建成,本书给出了 1000kV 变压器的绝缘水平。

为促进变压器试验技术的发展,满足广大从事变压器设计、制造、使用、试验的工人以及工程技术人员需要,总结国内外变压器试验技术和试验装备的发展经验,天威集团保定天威保变电气股份有限公司、保定保菱变压器有限公司和保定多田冷却设备有限公司结合多年来变压器试验的实践经验,组织编写了《变压器试验技术》这本书。

在本书的编写过程中,我们力求理论联系实际,既考虑到实际使用,又进行相应的理论分析。同时近年来变压器试验技术发展很快,试验设备和测试仪器不断更新,本书也有一定篇幅给予介绍。随着我国变压器产品进入国际市场,国家标准 GB 1094《电力变压器》、GB 311《高压输变电设备的绝缘配合 高电压试验技术》等正在根据 IEC 标准的修订在逐步进行修订。因此,我们结合国家标准的修订,还介绍了当前国内外变压器试验和试验装备的新技术。为了便于读者对各章内容的理解和掌握,在每章结尾部分均通过实例加以说明。

全书共分 19 章。第 1、3、10、16、19 章由胡启凡教授级高级工程师编写;第 2、8、9 章由王雪刚教授级高级工程师编写;第 4 章由李金芳高级工程师编写;第 5、6 章由谢毓城教授级高级工程师编写;第 7、14 章由张喜乐教授级高级工程师编写;第 11、12、13 章由高中纪高级工程师和孙继成工程师编写;第 15 章由王文昌教授级高级工程师编写;第 17 章由孙继成工程师编写;第 18 章由蔡向东高级工程师编写。全书由胡启凡教授级高级工程师主编。

天威集团保定天威保变电气股份有限公司领导对本书的编写给予了大力帮助和支持,组织了多名有经验的技术人员参加本书的编写;保定保菱变压器有限公司、保定多田冷却设备有限公司的领导也对本书的编写给予了大力帮助和支持,组织了李金芳高级工程师、蔡向东高级工程师参加了编写工作,使本书得以完成。天威集团保定天威保变电气股份有限公司、保定保菱变压器有限公司、保定多田冷却设备有限公司的质保部、试验站等单位也给予很大帮助。本书的很多实例均由天威集团保定天威保变电气股份有限公司、保定保菱变压器有限公司、保定多田冷却设备有限公司质保部、试验站提供,我们在此谨致以深切的谢意。

限于我们的水平,书中不妥和错误之处在所难免,衷心欢迎使用本书的广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 变压器试验的基础	1
1.1 概述	1
1.2 变压器试验的标准	2
1.3 变压器的试验项目	3
1.3.1 例行试验	3
1.3.2 型式试验	3
1.3.3 特殊试验	3
1.4 试验误差	4
1.4.1 误差的定义	4
1.4.2 按误差规律分类	5
1.4.3 误差的表达	6
1.4.4 误差的处理	8
1.5 测量不确定度	9
1.5.1 不确定度概述	9
1.5.2 测量误差与测量不确定度	9
1.5.3 测量不确定度的合成	12
1.5.4 扩展不确定度	12
1.5.5 结果修正	12
1.5.6 变压器标准对不确定度的要求	12
1.6 测量结果的有效数字(位数)	13
1.6.1 近似数	13
1.6.2 近似数的修约	13
1.6.3 有效数字	14
1.6.4 近似数的运算	15
第2章 电压比测量及联结组	
标号检定	17
2.1 概述	17
2.1.1 电压比测量的目的	17
2.1.2 电压比的允许偏差	17
2.2 电压比测量	18
2.2.1 测量方法	18
2.2.2 测量线路和测量方法	21
2.2.3 试验例	24
2.3 绕组联结组标号检定	27

2.3.1 绕组联结组	27
2.3.2 绕组联结组标号的测量	30
第3章 直流电阻测量	31
3.1 直流电阻测量的目的	31
3.2 直流电阻测量方法	31
3.2.1 伏—安表法测量直流电阻	31
3.2.2 电桥法测量直流电阻	32
3.3 测量结果计算	37
3.3.1 直流电阻和温度的关系	37
3.3.2 环境温度下测量结果换算到参考温度	37
3.3.3 三相变压器的直流电阻的不平衡率	37
3.3.4 配电变压器的电阻的不平衡率	39
3.3.5 相电阻和线电阻不平衡率之间的关系	40
3.4 有铁心的直流电路的过渡过程	41
3.4.1 有铁心的直流电路	41
3.4.2 磁路中的磁通分布	44
3.5 变压器直流电阻测量时的时间常数	46
3.6 变压器直流电阻测量的电流	47
3.7 缩短测量时间的方法	49
3.7.1 减小时间常数法	49
3.7.2 恒流源法直流电阻测量装置	49
3.7.3 绕组串联法	50
3.7.4 感应电动势法	50
3.8 电阻测量时的温度测量	51
3.8.1 绕组的电阻和温度	51
3.8.2 强迫油循环变压器的油温	53
3.9 直流电阻测量的程序和注意事项	53
3.9.1 选择测试电流	53
3.9.2 选择测试设备	54
3.10 试验实例	54

3.10.1 变压器数据	54	耐受电压	73
3.10.2 试验结果	54	5.4.2 变压器绝缘试验的 基本规定	75
第4章 绝缘特性测量	56	5.4.3 绝缘试验顺序	76
4.1 变压器的内绝缘特性	56	5.5 变压器的绝缘结构的分类	77
4.2 绝缘电阻、吸收比和极化指数 测量	56	5.5.1 概述	77
4.2.1 油纸绝缘介质的吸收现象 ...	56	5.5.2 内部绝缘结构	77
4.2.2 绝缘电阻测量	58	5.5.3 外部绝缘结构	95
4.2.3 绝缘电阻测量时应注意的 问题	58	5.6 变压器中使用的变压器油	97
4.2.4 不同温度下测量结果的 换算	59	5.6.1 化学特性	97
4.3 介质损耗因数($\tan\delta$)测量和 绕组对地和绕组间的电容测定 ...	61	5.6.2 物理特性	98
4.3.1 绝缘中的损耗	61	5.6.3 电气特性	99
4.3.2 介质损耗的测量	63	5.7 变压器中使用的绝缘纸板和 绝缘纸	104
4.3.3 不同温度下介质损耗测量 结果的比较	63	5.7.1 绝缘纸	104
4.3.4 不同电压下介质损耗测量 结果的比较	64	5.7.2 绝缘纸板	109
4.4 绝缘电阻和介质损耗因数测量 使用的仪表	65	5.7.3 成型绝缘件	113
4.4.1 绝缘电阻表	65	第6章 工频外试耐压试验	117
4.4.2 西林电桥	66	6.1 概述	117
4.4.3 介质损耗因数($\tan\delta$)测量 的新型仪器	67	6.2 变压器工频外试耐压试验	117
4.4.4 数字仪表——数字式高压 绝缘电阻表	69	6.2.1 工频外试耐压试验接线	117
第5章 变压器的绝缘结构	71	6.2.2 工频外试耐压试验的接线 方法	117
5.1 概述	71	6.3 变压器工频外试耐压试验设备 及仪表	119
5.2 变压器上通常作用的几种电压 ...	71	6.3.1 试验电源	119
5.3 几种不同类型电压的波形和在 绕组上的电压分布	72	6.3.2 中间试验变压器	120
5.3.1 长期工作电压和工频电压 升高	72	6.3.3 分压器和峰值电压表	124
5.3.2 外部过电压(雷电冲击 电压)	72	6.3.4 工频外试耐压试验的保护 装置	125
5.3.3 内部过电压(操作冲击 电压)	72	6.3.5 试验注意事项	126
5.3.4 特快速瞬态过电压	73	6.4 变压器工频外试耐压试验例	126
5.4 变压器绕组的绝缘试验	73	6.4.1 被试变压器规格	126
5.4.1 各电压等级变压器绕组的		6.4.2 试验变压器及电源选择	127
		6.4.3 测量仪表	127
		6.4.4 无功补偿容量选择	128
		6.4.5 试验电路	130
		6.4.6 试验操作	130
		第7章 感应电压试验及局部放电 测量	131
		7.1 概述	131
		7.2 试验要求	131

7.3 短时感应耐压试验(ACSD)	132	冲击电压	182
7.3.1 高压绕组为全绝缘的 变压器	132	8.3.4 冲击电压数字测量技术	184
7.3.2 高压绕组为分级绝缘的 变压器	133	8.4 变压器雷电冲击试验	191
7.4 长时感应电压试验(ACLD)	143	8.4.1 冲击试验方法	191
7.5 局部放电测量	145	8.4.2 雷电冲击电压波形 的调整	195
7.5.1 局部放电的主要 表征参数	145	8.4.3 冲击试验故障判断原理及 方法	198
7.5.2 局部放电测量方法	146	8.4.4 冲击试验的典型 示伤波形	205
7.5.3 局部放电测量系统	148	8.4.5 变压器冲击试验实例	213
7.5.4 变压器局部放电测量中的 抗干扰措施	152	8.5 低电压冲击测量	215
7.6 局部放电源定位	153	8.5.1 低电压冲击波发生器	216
7.6.1 电气定位法	154	8.5.2 测量仪器	218
7.6.2 超声波定位法	155	8.5.3 测量实例	219
7.7 试验设备	159	第9章 操作冲击电压试验	224
7.7.1 试验电源	159	9.1 概述	224
7.7.2 中间变压器	160	9.2 操作冲击电压波形	225
7.7.3 辅助增压变压器	160	9.3 操作冲击电压波形的产生	226
7.8 试验应注意的几个问题	160	9.3.1 利用冲击电压发生器产生 操作冲击电压	226
7.8.1 试验准备及监测	160	9.3.2 利用变压器低压励磁产生 操作冲击电压	226
7.8.2 同步发电机的 自励磁现象	160	9.4 操作冲击电压波形参数 的估算	227
7.8.3 试验电压的测量	161	9.4.1 变压器等效参数的确定	227
7.8.4 高压套管内部放电	161	9.4.2 利用冲击电压发生器产生 操作电压的参数估算	229
7.8.5 局部放电测量仪频带宽度 的选择	162	9.4.3 利用变压器产生操作电压的 参数估算	230
7.9 实例与分析	162	9.5 变压器操作冲击试验	232
第8章 雷电冲击试验	166	9.5.1 操作冲击试验线路 及方法	233
8.1 概述	166	9.5.2 操作冲击电压试验的故障 诊断	234
8.2 冲击电压发生器	166	9.5.3 操作冲击试验实例	236
8.2.1 标准冲击电压波形	166	第10章 变压器损耗测量及误差	239
8.2.2 冲击电压发生器的工作 原理	167	10.1 概述	239
8.2.3 截波电压的产生	171	10.1.1 空载损耗	239
8.2.4 冲击电压发生器实例	172	10.1.2 负载损耗	239
8.3 冲击电压测量技术	176	10.1.3 辅机损耗	239
8.3.1 利用球间隙测量 冲击电压	176	10.1.4 变压器损耗的表达式及	
8.3.2 冲击分压器测量系统	176		
8.3.3 使用电场传感器测量			

矢量图	240	的误差	262
10.2 变压器损耗测量的线路	240	10.6.3 新型损耗测量系统和标准 损耗测量系统在现场损耗 测量的对比试验结果	263
10.2.1 单相变压器损耗测量的 电压表、电流表和功率表 (V,A,W)线路	240	10.7 商品变压器损耗测量系统	263
10.2.2 三相变压器损耗测量的 电压表、电流表和功率 表(V,A,W)线路,三功 率表法	240	10.7.1 瑞士哈弗莱(Haefely)公司 TMS 580 损耗测量系统 ...	263
10.2.3 三相变压器损耗测量的 电压表、电流表和功率 表(V,A,W)线路,二功 率表法	243	10.7.2 加拿大国际测量(Mesurements Internl)公司 LMS-2000 系统	264
10.2.4 数字变压器损耗 测量电路	245	10.8 对测量系统准确度的要求	266
10.2.5 电桥法测量损耗	245	第11章 空载损耗和空载电流测量	267
10.3 损耗测量的误差	246	11.1 概述	267
10.3.1 误差表达式	246	11.2 变压器的空载损耗和 空载电流	267
10.3.2 变压器损耗 测量时的 $\cos\varphi$	247	11.2.1 空载损耗	267
10.4 损耗测量的校正	248	11.2.2 空载电流	268
10.4.1 系统误差	248	11.3 变压器制造厂的空载试验	269
10.4.2 系统误差的校正	249	11.4 空载试验方法与线路	270
10.4.3 IEEE C57.12.90 标准 给出的修正角差的公式 ...	250	11.4.1 试验线路	270
10.4.4 未定系统误差	252	11.4.2 试验方法	270
10.4.5 随机误差	252	11.5 空载电流	272
10.4.6 损耗测量系统的角差 校正的可能性	252	11.5.1 变压器铁心的励磁电流 ...	272
10.5 损耗测量的不确定度	254	11.5.2 电容电流的影响	273
10.5.1 误差与不确定度	254	11.6 空载试验所用的设备和仪器 仪表	276
10.5.2 变压器标准对测量不确 定度的要求	254	11.6.1 试验电源	276
10.5.3 测量误差与测量 不确定度	255	11.6.2 中间变压器	278
10.5.4 测量误差的合成	257	11.6.3 测量用互感器和仪表	279
10.5.5 测量不确定度的合成	257	11.7 铁心绕临时绕组试验	279
10.5.6 结果修正	258	11.8 非额定条件下的空载试验	280
10.5.7 损耗测量不确定度实例 ...	258	11.8.1 波形非实际正弦波	280
10.6 先进的测量系统	258	11.8.2 电压不是额定电压时进行 空载试验	281
10.6.1 系统构成	259	11.8.3 非额定频率时的空载 试验	281
10.6.2 标准测量系统的功率测量 的误差	262	11.8.4 单相试验	281
		11.9 空载试验不确定度	285
		11.9.1 功率因数 $\cos\varphi$ 的影响	285
		11.9.2 电压表的影响	286
		11.10 空载电流谐波测量	286
		11.10.1 三根三柱铁心变压器的	

空载电流谐波	286	12.6.3 变压器的相序阻抗	310
11.10.2 三相五柱铁心变压器的		12.6.4 零序阻抗的测量	315
空载电流谐波	287	12.7 零序阻抗试验实例	315
第12章 负载损耗和短路阻抗		12.7.1 绕组 YNd 联结,三相三柱	
及零序阻抗测量	289	铁心变压器	315
12.1 负载试验概述	289	12.7.2 绕组 YNynd 联结,三相三柱	
12.1.1 负载损耗	289	铁心变压器	316
12.1.2 短路阻抗	290	12.7.3 绕组 YNd 联结,三相五柱	
12.2 负载损耗和短路阻抗的测量 ..	290	铁心变压器	316
12.2.1 试验电路	290	12.7.4 绕组 YNynd 联结,三相五柱	
12.2.2 负载试验的方法	292	铁心变压器	316
12.2.3 负载试验步骤	292	12.8 负载试验的不确定度	317
12.2.4 负载损耗校正到		12.8.1 短路阻抗测量的	
参考温度	293	不确定度	317
12.2.5 短路阻抗试验结果的		12.8.2 负载损耗测量的	
计算	296	不确定度	318
12.3 非额定条件下负载损耗和短路		第13章 温升试验	320
阻抗的测量	297	13.1 概述	320
12.3.1 非额定电流条件下负载		13.1.1 油浸式电力变压器的温升	
损耗和短路阻抗的测量 ..	297	限值	320
12.3.2 非额定频率条件下负载		13.1.2 干式电力变压器的温升	
损耗和短路阻抗的测量 ..	298	限值	321
12.3.3 三相变压器的单相负载		13.2 变压器的发热和冷却	321
损耗和短路阻抗的测量 ..	299	13.2.1 变压器的发热过程	321
12.4 负载损耗和短路阻抗测量应		13.2.2 变压器的发热	
注意的问题	300	和冷却过程	323
12.4.1 正确选择试验电源容量 ..	300	13.3 温升试验	324
12.4.2 负载损耗和短路阻抗		13.3.1 直接负载法	325
测量试验时的功率因		13.3.2 相互负载法	325
数 $\cos\varphi$	300	13.3.3 循环电流法	327
12.4.3 负载损耗和短路阻抗测量		13.3.4 零序电流法	329
持续时间	301	13.3.5 短路法	331
12.4.4 负载损耗和短路阻抗测量		13.4 温度测量	334
使用的短路连接线	301	13.4.1 变压器油顶层温度测量 ..	334
12.5 试验实例	302	13.4.2 变压器油的平均温度	335
12.5.1 三绕组变压器	302	13.4.3 冷却介质温度测量	336
12.5.2 自耦变压器	304	13.4.4 绕组温度测量	337
12.5.3 分裂变压器负载损耗和		13.5 温升试验结果的计算	341
短路阻抗测量	306	13.5.1 电源切断瞬间	
12.6 三相变压器零序阻抗测量	309	绕组的温度	341
12.6.1 概述	309	13.5.2 传统的图解外推法	342
12.6.2 三相系统的对称分量	309	13.5.3 确定绕组内油平均温升	

和绕组温升的	
另一种方法	343
13.5.4 油平均温升变化的修正 ..	344
13.5.5 非标准试验状态的校正 ..	344
13.6 温升试验电源容量补偿和中间	
变压器	345
13.6.1 电源容量计算	345
13.6.2 电源补偿及中间变压器 ..	345
13.7 变压器局部温度测量	347
13.7.1 变压器绕组热点	
温度测量	347
13.7.2 油箱外部的	
局部温度测量	349
13.7.3 变压器油的色谱分析	350
13.8 温升试验实例	350
13.8.1 变压器规格	350
13.8.2 试验方案	350
13.8.3 试验	351
13.8.4 试验数据计算	353
13.9 温升试验的不确定度	355
13.9.1 油温升测量的不确定度 ..	355
13.9.2 绕组温升测量的	
不确定度	356
第14章 承受短路能力试验	357
14.1 概述	357
14.2 变压器绕组受力情况及短路	
过渡过程	357
14.2.1 变压器绕组受力情况	357
14.2.2 短路过渡过程	358
14.3 试验标准及要求	359
14.3.1 具有两个独立绕组的	
变压器	359
14.3.2 多绕组变压器	
和自耦变压器	360
14.3.3 特殊用途的变压器	360
14.4 变压器承受短路的耐热能力 ..	361
14.4.1 对称短路电流	361
14.4.2 对称短路电流的	
持续时间	361
14.4.3 绕组平均温度的最大	
允许值	361
14.4.4 绕组平均温度的计算	362
14.5 变压器承受短路的	
动稳定能力	362
14.5.1 双绕组变压器的	
短路试验	362
14.5.2 三绕组变压器和自耦变	
压器的短路试验	365
14.5.3 故障检测和试验	
结果判断	365
14.6 承受短路动稳定能力的理论	
评估	367
14.6.1 设计评审导则	367
14.6.2 变压器评估	369
14.6.3 设计评审结果及对待评估	
变压器的确认	372
14.6.4 类似变压器的确定	376
14.7 短路试验实例	376
14.7.1 技术参数	376
14.7.2 试验依据	377
14.7.3 试验方法	377
14.7.4 试验结果	377
14.7.5 试验结论	379
第15章 变压器油试验	380
15.1 变压器油基础知识	380
15.1.1 变压器油的化学组成	380
15.1.2 变压器油和变压器的密切	
关系	380
15.1.3 变压器油试验的意义及质量	
指标、试验方法	381
15.2 取样	383
15.2.1 取样方法的重要性	383
15.2.2 取样基本要求	383
15.2.3 取样操作	384
15.3 运动粘度	384
15.3.1 概述	384
15.3.2 测试仪器与所需材料	385
15.3.3 测试操作	386
15.4 倾点	386
15.4.1 概述	386
15.4.2 测试仪器与冷却剂	387
15.4.3 测试操作	387
15.5 含水量	388
15.5.1 概述	388

15.5.2 测试原理和仪器	388	15.14.3 T501 的定量测定	408
15.5.3 测试操作	390	15.15 2-呋喃甲醛含量	410
15.6 击穿电压	390	15.15.1 概述	410
15.6.1 概述	390	15.15.2 测试仪器和试剂	411
15.6.2 测试仪器和条件	391	15.15.3 将糠醛及其衍生物从 油中萃取出来	412
15.6.3 测试操作	392	15.15.4 标准溶液的配制	413
15.7 密度	393	15.15.5 测试操作	414
15.7.1 概述	393	15.16 氧化稳定性	415
15.7.2 测试仪器	393	15.16.1 概述	415
15.7.3 测试操作	393	15.16.2 测试仪器和材料	415
15.7.4 极低、极高温下油 密度的测试	394	15.16.3 氧化老化过程	417
15.8 介质损耗因数($\tan\delta$)	394	15.16.4 沉淀物测试操作	418
15.8.1 概述	394	15.16.5 总酸度测定操作	418
15.8.2 测试仪器	395	15.16.6 介质损耗因数测定	419
15.8.3 测试操作	395	15.17 析气性	419
15.9 体积电阻率	397	15.17.1 概述	419
15.9.1 概述	397	15.17.2 测试仪器和试剂	419
15.9.2 测定方法	397	15.17.3 测试操作	420
15.10 酸度	398	15.18 闪点	421
15.10.1 概述	398	15.18.1 概述	421
15.10.2 标准氢氧化钾乙醇溶液的 配制	398	15.18.2 测试仪器	421
15.10.3 电位滴定法	398	15.18.3 测试操作	422
15.10.4 指示剂法	400	15.19 稠环芳烃含量	422
15.10.5 快速测定法简介	400	15.19.1 概述	422
15.11 水溶性酸	400	15.19.2 测试仪器和材料、试剂	423
15.11.1 概述	400	15.19.3 油样的制备	423
15.11.2 水溶性酸萃取方法	401	15.19.4 测试操作	424
15.11.3 比色测定法	401	15.20 多氯联苯含量	426
15.11.4 酸度计法	402	15.20.1 概述	426
15.12 界面张力	402	15.20.2 测试试剂和仪器	427
15.12.1 概述	402	15.20.3 色谱操作条件	429
15.12.2 测试仪器	403	15.20.4 仪器性能校正	431
15.12.3 测试操作	403	15.20.5 试样提纯处理	433
15.13 总硫含量和腐蚀性硫	404	15.20.6 测试操作	434
15.13.1 概述	404	15.21 含气量	437
15.13.2 测试仪器和所需材料	405	15.21.1 概述	437
15.13.3 测试操作	405	15.21.2 真空盐水法	438
15.14 抗氧化添加剂含量	406	15.21.3 二氧化碳洗脱法	439
15.14.1 概述	406	15.21.4 机械振荡法	440
15.14.2 T501 的定性鉴别	407	15.22 油中溶解气体组分分析	441
		15.22.1 概述	441

15.22.2	脱气方法	441	17.4.2	额定电流和阻抗电压	464
15.22.3	色谱仪	443	17.5	变压器声级测量方法	464
15.22.4	计算方法	445	17.5.1	试品的方位	464
15.22.5	测试操作	446	17.5.2	声压测量法	464
15.22.6	变压器故障诊断方法	448	17.5.3	声强测量法	469
15.23	特殊试验	449	17.5.4	声功率级的计算	470
15.23.1	杂质颗粒含量	449	17.6	额定电压和额定电流条件下 声功率的合成	471
15.23.2	变压器油带电度	449	17.7	测量方法选择的指导原则	471
第16章	油流带电测量	451	17.8	工厂试验与现场声级测量的 差异	471
16.1	油流带电	451	17.8.1	概述	471
16.2	变压器油流带电的测量方法	453	17.8.2	负载功率因数	471
16.2.1	长时间空载试验	454	17.8.3	负载电流	472
16.2.2	油流静电试验	454	17.8.4	运行电压	472
16.2.3	转动油泵时的局部放电 测量	454	17.8.5	运行温度	472
16.3	试验实例	454	17.8.6	负载电流和电压中的 谐波	472
16.3.1	被试产品	454	17.8.7	直流磁化	472
16.3.2	油流带电试验	454	17.8.8	剩磁效应	472
16.4	变压器运行中出现 油流放电例	455	17.8.9	由反射引起的 声级附加值	472
16.4.1	故障情况	455	17.8.10	现场测量时的 距离影响	473
16.4.2	故障情况检查	456	17.8.11	具有饱和电抗器和/或 相间变压器的 换流变压器	473
16.4.3	分析	456	17.9	声压法测定变压器声级实例	473
16.4.4	试验	456	17.9.1	变压器运行条件	473
16.4.5	试验结果	457	17.9.2	测量位置	473
第17章	变压器声级测定	458	17.9.3	测量仪器	474
17.1	概述	458	17.9.4	测量结果	474
17.2	有关噪声的几个概念	458	17.9.5	测量环境修正值 K 的 确定	475
17.2.1	噪声	458	17.9.6	声级计算	476
17.2.2	声压、声压级	458	第18章	冷却装置试验	477
17.2.3	声强、法向声强、法向声 强级	458	18.1	概述	477
17.2.4	声功率、声功率级	459	18.2	片式散热器	477
17.2.5	声场	459	18.2.1	型式及规格	477
17.3	变压器和电抗器的噪声源及 其特点	460	18.2.2	型号编制	478
17.3.1	概述	460	18.2.3	试验方法及要求	478
17.3.2	声源	460	18.3	强迫油循环冷却器	481
17.3.3	振动的传递	463			
17.3.4	声发射	463			
17.4	声级测量的负载条件	464			
17.4.1	额定电压和空载电流	464			

18.3.1 型式及规格	481	19.3 有载分接开关型式试验项目 ...	495
18.3.2 型号编制	482	19.3.1 有载分接开关触头温升	
18.3.3 试验方法及要求	482	试验	495
18.4 强迫油循环水冷冷却器	485	19.3.2 有载分接开关切换试验 ...	495
18.4.1 型式及规格	485	19.3.3 短路电流试验	506
18.4.2 型号编制	485	19.3.4 过渡阻抗试验	510
18.4.3 试验方法及要求	486	19.3.5 机械试验	510
18.5 强迫油循环风冷却器冷却容量		19.3.6 绝缘试验	513
和油路压降试验实例(中国原		19.4 有载分接开关的例行试验	516
子能研究院检测报告)	488	19.4.1 机械试验	517
18.5.1 样品参数	488	19.4.2 顺序试验	517
18.5.2 检测设备	488	19.4.3 辅助线路绝缘试验	517
18.5.3 测量系统	488	19.4.4 压力及真空试验	517
18.5.4 检测方法	489	19.5 有载分接开关的特殊试验	517
18.5.5 检测结果	489	19.5.1 概述	517
18.6 风扇电动机和油泵电动机		19.5.2 绝缘放电试验	517
汲取功率测量	490	19.6 有载分接开关的电动机构技术	
18.6.1 风扇电动机汲取		要求	517
功率测量	490	19.6.1 一般技术要求	517
18.6.2 油泵电动机汲取		19.7 有载分接开关的电动机构的	
功率测量	491	试验	518
第 19 章 分接开关试验	492	19.7.1 有载分接开关电动机构的	
19.1 概述	492	型式试验	518
19.2 有载分接分接开关	492	19.7.2 例行试验	519
19.2.1 有载分接开关的类别	492	19.8 无励磁分接开关的技术要求 ...	519
19.2.2 额定值	492	19.8.1 一般技术要求	519
19.2.3 切换开关和选择开关的		19.8.2 无励磁分接开关的型式	
油室	494	试验	519
19.2.4 油位计	494	19.8.3 无励磁分接开关	
19.2.5 防止压力上升的		例行试验	523
安全要求	494	19.8.4 无励磁分接开关的电动	
19.2.6 转换选择器恢复电压	494	机构技术要求	524
19.2.7 粗细调转换漏电感	494	参考文献	526

第1章 变压器试验的基础

1.1 概述

自 1884 年第 1 台闭合铁心变压器问世以来，已有 100 多年历史了。由于电力工业能够向工农业生产和人民生活提供方便和经济的能源，所以电力工业在 100 多年来有了快速的发展。

1949 年新中国成立以后，随着国民经济的快速发展，电力工业同样地也有了快速发展，见表 1-1。

表 1-1 我国发电装机容量和发电量增长

年 份	发电机装机容量/万 kW	年发电量/亿 kW·h	年 份	发电机装机容量/万 kW	年发电量/亿 kW·h
1949	185	43	1995	21 772	9942
1952	197	73	2000	31 932	13 510
1957	464	193	2001	33 849	14 706
1962	1304	458	2002	35 300	16 400
1965	1508	676	2003	39 100	19 052
1970	2377	1159	2004	44 070	21 870
1975	4341	1958	2005	51 718.5	24 975.3
1981	6913	3006	2006	62 369.8	28 498.5
1985	8705	4107	2007	71 822	32 644
1990	13 789	6213			

资料来源：中国电力企业联合会统计信息部，中国电力统计数据分析（2008），2008 年 7 月。

随着发电能力的增加，输电线路的电压、输送容量和输电距离也在不断增加。截止到 2001 年底全国 110kV 及以上输电线路见表 1-2，历年变压器生产容量见表 1-3。

表 1-2 中国输电线路的电压和长度 (单位：km)

电压等级/kV \ 年 份	500	330	220	110
1949			765	340
1955			1401	917
1962			3165	12 895
1970			3410	15 994
1975		534	14 201	48 689
1980		866	28 464	64 874
1985	2539	1278	46 056	84 468
1990	7104	3870	70 891	115 013
1995	13 027	5482	91 754	157 958
2000	25 910	8534	122 597	195 001
2001	30 794	9177	129 878	214 380

2007 年中国的第一条 750kV 交流输电线路已投入运行, 2008 年底特高压交流 1000kV 示范工程的线路已投入试运行。中国自行设计和建造的 $\pm 100\text{kV}$ 直流高压输电线 (从浙江省的镇海到舟山岛), 全长 53.1km (其中海底电缆 11km), 已于 1988 年投入运行。自葛洲坝水电厂到上海的全长为 1080km 的 $\pm 500\text{kV}$ 高压直流输电线路也已于 1989 年建成投入运行。自云南至广东 $\pm 800\text{kV}$ 直流工程 2009 年将投入试运行。

变压器是输送电能的重要设备之一, 变压器的质量和可靠性直接关系到安全可靠地输送电力, 直接影响到工农业生产和人民生活用电的正常供应, 对国民经济的影响很大。

表 1-3 中国历年新增变压器容量 (万 kVA)

电压等级/kV 年 份	500	330	220	110
1949			33	7
1955			53	20
1962			234	590
1972		24	812	1997
1975		49	1615	2968
1980		79	3418	5162
1985	632	159	5668	7687
1990	2069	471	10 407	13 914
1995	4507	819	18 027	22 163
2000	9447	1410	30 632	35 384
2001	11 731	1527	34 026	40 238
	500	330	220	110
2007	8005	846	9879	6264

资料来源: 中国电力企业联合会统计信息部, 中国电力工业统计分析 (2008), 2008 年 7 月

近年来我国电力工业发展很快, 发电机单台容量已达到 1000MW, 交流输变电电压也提高到 750kV, 对输变电设备可靠性的要求也就越来越高, 因为大容量高电压变压器供电范围大, 变压器的损坏将会引起电网供电混乱, 造成部分面积供电终止, 影响很大。

近年来, 由于对变压器安全可靠运行的要求在逐步提高, 因此, 变压器的检测技术也有了相应的发展。如大型变压器在额定电压下的短路试验、局部放电测量及定位技术、将传递函数用于变压器冲击示伤和绕组变形检测、数字技术用于损耗测量、在噪声测量方面提出了声强法、将频谱测量用于变压器绕组的变形诊断以及变压器油的色谱分析得到越来越广泛的应用。

1.2 变压器试验的标准

为保证变压器能满足电力输送的质量和可靠性要求, 国家制定了变压器和变压器试验的标准, 即

- (1) 《电力变压器 第 1 部分 总则》(GB 1094.1—1996)
- (2) 《电力变压器 第 2 部分 温升》(GB 1094.2—1996)
- (3) 《电力变压器 第 3 部分 绝缘水平和绝缘试验》(GB 1094.3—2003)
- (4) 《电力变压器 第 4 部分 电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则》(GB 1094.4—2005)

- (5) 《电力变压器 第5部分 承受短路的能力》(GB 1094.5—2003)
- (6) 《电力变压器 第10部分 声级测定》(GB 1094.10—2003)
- (7) 《电力变压器 第11部分 干式电力变压器》(GB 1094.11—2007)
- (8) 《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》(GB/T 6451—2008)
- (9) 《750kV 单相油浸式电力变压器技术参数和要求》(JB/T 10780—2007)
- (10) 《油浸式电力变压器负载导则》(GB/T 15164—1994)
- (11) 《电力变压器应用导则》(GB 13499—2002)
- (12) 《标准电压》(GB 156—2007)
- (13) 《电力变压器选用导则》(GB/T 17468—1998)
- (14) 《高压输变电设备的绝缘配合》(GB 311.1—1997)
- (15) 《绝缘配合 第2部分 高压输变电设备的绝缘配合 使用导则》(GB 311.2—2002)
- (16) 《高电压试验技术 第1部分 一般试验要求》(GB/T 16927.1—1997)
- (17) 《高电压试验技术 第2部分 测量系统》(GB/T 16927.2—1997)
- (18) 《局部放电测量》(GB/T 7354—2003)
- (19) 《冲击试验用数字记录仪第1部分对数字记录仪的要求》(GB/T 16896.1—2005)
- (20) 《工频电场测量》(GB/T 12720—1991)
- (21) 《变压器油》(GB 2536—1990)
- (22) 《电力变压器试验导则》(JB/T 501—2006)

1.3 变压器的试验项目

在国家标准《电力变压器 第1部分 总则》(GB 1094.1—1996)中,规定了变压器要进行3种试验:例行试验(每台变压器在出厂前都要进行的出厂试验)、型式试验和特殊试验项目。

各变压器制造厂也各自规定了制造过程中的各项试验。

1.3.1 例行试验

- (1) 绕组电阻测量。
- (2) 电压比测量和联结组标号检定。
- (3) 短路阻抗和负载损耗的测量。
- (4) 空载电流和空载损耗的测量。
- (5) 绕组对地绝缘电阻和(或)绝缘系统电容的介质损耗因数($\tan\delta$)的测量。
- (6) 绝缘例行试验、变压器绝缘的例行试验,见表1-4的出厂试验项目。
- (7) 有载分接开关试验。
- (8) 绝缘油试验。

1.3.2 型式试验

- (1) 温升试验。
- (2) 绝缘型式试验,见表1-4的型式试验项目。

1.3.3 特殊试验

- (1) 绝缘特殊试验,见表1-4。
- (2) 绕组对地和绕组间电容的测定。
- (3) 瞬态电压传输特性的测定。
- (4) 三相变压器零序阻抗的测量。