

清华大学电气工程系列教材

# 电力设备的在线监测与故障诊断

## On-line Monitoring and Diagnosis for Power Equipment

王昌长 李福祺 高胜友 编著

Wang Changchang Li Fuqi Gao Shengyou

清华大学出版社

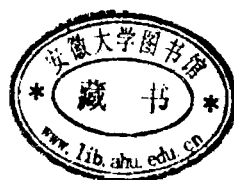
清华大学电气工程系列教材

# 电力设备的在线监测与故障诊断

## On-line Monitoring and Diagnosis for Power Equipment

王昌长 李福祺 高胜友 编著

Wang Changchang Li Fuqi Gao Shengyou



清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

电力设备绝缘的在线监测与故障诊断是当前电力行业最具活力的技术领域之一。本书介绍相关的监测与诊断技术,内容包括传感器技术、监测系统的基本组成和数据处理等基础知识,局部放电、介质损耗角正切  $\tan\delta$  和油中溶解气体的气相色谱分析等绝缘性能的基本测量方法,并着重介绍在线监测技术在电力设备(包括发电机、变压器、断路器、互感器和电缆等)中的具体应用。同时还介绍了国内外该领域的最新发展。

本书可作为高等学校电气工程一级学科的专业基础课教材,也可作为电力行业绝缘监督部门技术人员的参考用书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

电力设备的在线监测与故障诊断/王吕长,李福祺,高胜友编著. —北京:清华大学出版社,2006.3

(清华大学电气工程系列教材)

ISBN 7-302-12200-8

I. 电… II. ①王… ②李… ③高… III. ①电气绝缘—在线—故障监测—高等学校—教材 ②电气绝缘—在线—维修—高等学校—教材 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 009655 号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:张占奎

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:19.25 字数:453千字

版 次:2006年3月第1版 2006年3月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-12200-8/TM·77

印 数:1~3000

定 价:31.00元

## 清华大学电气工程系列教材编委会

主 任 王贇基

编 委 邱阿瑞 梁曦东 夏 清  
袁建生 周双喜 谈克雄  
王祥珩

# 序

“电气工程”一词源自英文的“Electrical Engineering”。在汉语中，“电工程”念起来不顺口，因而便有“电机工程”、“电气工程”、“电力工程”或“电工”这样的名称。20世纪60年代以前多用“电机工程”这个词。现在国家学科目录上已经先后使用“电工”和“电气工程”作为一级学科名称。

大致是第二次世界大战之后出现了“电子工程”(Electronic Engineering)这个词。之后，随着科学技术的迅速发展，从原来的“电(机)工程”范畴里先后分出去了“无线电电子学(电子工程)”、“自动控制(自动化)”等专业，“电(机)工程”的含义变窄了。虽然“电(机、气)工程”的专业含义缩小到“电力工程”和“电工制造”的范围，但是科学技术的发展使得学科之间的交叉、融合更加密切，学科之间的界限更加模糊。“你中有我，我中有你”是当今学科或专业的重要特点。因此，虽然高等院校“电气工程”专业的教学主要定位于培养与电能的生产、输送、应用、测量、控制等技术相关的专业人才，但是教学内容却应该有更宽广的范围。

清华大学电机系在1932年建系时，课程设置基本上仿效美国麻省理工学院电机工程学系的模式。一年级学习工学院的共同必修课，如普通物理、微积分、英文、国文、画法几何、工程画、经济学概论等课程；二年级学习电工原理、电磁测量、静动力学、机件学、热力学、金工实习、微分方程及化学等课程；从三年级开始专业分组，电力组除继续学习电工原理、电工实验、测量外，还学习交流电路、交流电机、电照学、工程材料、热力工程、电力传输、配电工程、发电所、电机设计与制造以及动力厂设计等选修课程。西南联大时期加强了数学课程，更新了电工原理教材，增加了电磁学、应用电子学等主干课程和电声学、运算微积分等选修课程。抗战胜利之后又增设了一批如电子学及其实验、开关设备、电工材料、高压工程、电工数学、对称分量、汞弧整流器等选修课程。

1952年院系调整之后，开始了学习前苏联教育模式的教学改革。电机系以莫斯科动力学院和列宁格勒工业大学为模式，按专业制定和修改教学计划及教学大纲。这段时期教学计划比较注重数学、物理、化学等基础课，注重电工基础、电机学、工业电子学、调节原

理等技术基础课,同时还加强了实践环节,包括实验、实习和“真刀真枪”的毕业设计等。但是这个时期存在专业划分过细、工科内容过重等问题。

改革开放之后,教学改革进入一个新的时期。为了适应科学技术的发展和人才市场从计划分配到自主择业转变的需要,清华大学电机系在20世纪80年代末把原来的电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、电机及其控制等专业合并成“宽口径”的“电气工程及其自动化”专业,并且开始了更深刻的课程体系的改革。首先,技术基础课的课程设置和内容得到大大的拓展。不但像电工基础、电子学、电机学这些传统的技术基础课的教学内容得到更新,课时有所压缩,而且像计算机系列课、控制理论、信号与系统等信息科学的基础课程以及电力电子技术系列课已经规定为本专业必修课程。此外,网络和通信基础、数字信号处理、现代电磁测量等也列入了选修课程。其次,专业课程设置为专业基础课和专业课两类,初步完成了从“拼盘”到“重组”的改革,覆盖了比原先3个专业更宽广的领域。电力系统分析、高电压工程和电力传动与控制等成为专业基础课,另外,在专业课之外还有一组以扩大专业知识和介绍新技术、新进展为主的任选课程。

虽然在电气工程学科基础上新产生的一些研究方向先后形成独立的学科或专业,但是曾经作为第三次工业革命三大动力之一的电气工程,其内涵和外延都会随着科学技术和社会经济的发展而发展。大功率电力电子器件、高温超导线材、大规模互联电网、混沌动力学、生物电磁学等新事物的出现和发展等,正在为电气工程学科的发展开辟新的空间。教学计划既要有相对的稳定,又要与时俱进、不断有所改革。相比之下,教材的建设往往相对滞后。因此,清华大学电机系决定分批出版电气工程系列教材,这些教材既反映近10多年来广大教师积极进行教学改革已经取得的丰硕成果,也表明我们在教材建设上还要不断努力,为本专业和相关专业的教学提供优秀教材和教学参考书的决心。

这是一套关于电气工程学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。主要读者对象为电气工程专业的本科生、研究生以及在本专业领域工作的科学工作者和工程技术人员。欢迎广大读者提出宝贵意见。

清华大学电气工程系列教材编委会

2003年8月于清华园

# 前言

对电力设备进行在线监测和故障诊断,是实现设备预知性维修的前提,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 30 多年来,在线监测和故障诊断技术在世界上得到了迅速发展和广泛应用。为适应这种技术上的发展,清华大学电机工程与应用电子技术系在本科和研究生教学计划上分别安排了“电气设备在线监测”和“电力设备诊断技术”的选修课程。编著者为此于 1996 年编写了一本与本书同名的讲义,受到广大读者的欢迎。

本书是编著者在讲授上述课程和长期从事在线监测科研工作的基础上,对该讲义作了广泛的修改和充实后编写而成。内容以监测技术为主,既论述原理,也介绍具体的监测系统和应用技术。考虑到监测和诊断之间的密切关系,以及知识的系统性、完整性,本书还讲述一些诊断技术和寿命预测的知识,并对有关绝缘结构、绝缘劣化的基本知识也作了简单介绍,以便读者更好地理解监测的依据和目的。其中监测技术又以绝缘性能的监测为主,因为绝缘故障是电力设备的主要故障模式。同时,本书针对不同设备的特点,论述了一些其他常用的监测内容,例如电机的振动、温度、气隙间距、气隙磁通密度,以及断路器的机械特性等监测,以使读者对一台电力设备的整体性能的监测有较完整的概念。根据以上考虑,第 1 章论述了发展在线监测技术的必要性和概况。第 2 章讨论了各种电力设备进行在线监测的共同性问题,包括监测系统的组成、各类传感器的原理和结构、抗干扰技术、数据处理、诊断技术等。第 3 章为电容型设备和电力电容器的在线监测。第 4 章是避雷器的在线监测与故障诊断。第 5 章是电力电缆的在线监测和故障定位。第 6 章介绍电力设备的红外监测与故障诊断。第 7 章叙述变压器油中溶解气体的在线监测与故障诊断。第 8 章论述电力变压器的在线监测与故障诊断。第 9 章讲述电机的在线监测与故障诊断。第 10 章是高压断路器和气体绝缘金属封闭开关设备的在线监测与故障诊断。

在取材上,本书尽量介绍国内外的先进和成熟的技术,同时重视对国内同行单位和本校近 20 年来在该领域内的科研成果的介绍。由于在线监测技术尚在发展之中,现场的具体情况也不尽相同,因此不同单位在观点上、技术应用上可能会有所不同,难以作出结论

性判断,需通过实践不断总结,完善。

本书由李福祺编写第1章,第2章的2.3节~2.5节,第5章,第8章,第9章的9.2.5节~9.10节并整理全书的图稿。高胜友编写第3章,第4章,第7章。王昌长编写第2章的其余各节,第6章,第9章的9.1节~9.2.4节及9.11节,第10章和附录。全书由王昌长主编并统稿。

本书在编写过程中得到了高电压和绝缘技术研究所的朱德恒教授、谈克雄教授、陈昌渔教授、钱家骊教授、张节容教授、徐国政教授、刘卫东教授、黄瑜龙副教授以及南加州大学电机工程系金显贺博士等许多同事的支持和帮助。北京电力科学研究院程玉兰高工不仅为第6章的编写提供了有关资料和图片,并审阅了原稿。中国电子信息产品集团公司李征制作了全书的原始电子图稿。在此一并致以衷心的感谢。

由于编著者学识水平所限,有些内容也未经亲自实践难免有谬误或不妥之处,望读者不吝指正。

作 者

2005年12月于清华园



# 目录

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 电气设备的绝缘故障及其危害性 .....	1
1.2 在线监测与状态维修的必要性及意义 .....	2
1.2.1 预防性维修和试验.....	2
1.2.2 状态维修和在线监测.....	3
1.3 在线监测技术的国内外发展概况及趋势 .....	4
1.4 在线监测系统的技术要求 .....	7
思考题和讨论题.....	7
参考文献.....	8
<b>第 2 章 监测系统的组成</b> .....	9
2.1 系统的组成和分类 .....	9
2.1.1 系统的组成.....	9
2.1.2 系统的分类 .....	10
2.2 传感器.....	11
2.2.1 概述 .....	11
2.2.2 温度传感器 .....	11
2.2.3 红外线传感器 .....	13
2.2.4 振动传感器 .....	17
2.2.5 电流传感器 .....	18
2.2.6 电压(电场)传感器 .....	25
2.2.7 气敏传感器 .....	25
2.2.8 湿敏传感器 .....	29
2.3 数据采集系统.....	30

2.3.1	数据的采集 .....	30
2.3.2	信号的传输和传输过程中的干扰抑制 .....	32
2.3.3	光电信号传输通道 .....	33
2.4	抗干扰技术概述 .....	37
2.4.1	硬件措施 .....	38
2.4.2	软件措施 .....	40
2.5	数据处理 .....	46
2.5.1	时域分析 .....	46
2.5.2	频域分析(频谱分析) .....	46
2.5.3	相关分析 .....	47
2.5.4	统计分析 .....	48
2.6	诊断 .....	48
2.6.1	概述 .....	48
2.6.2	阈值诊断 .....	49
2.6.3	模糊诊断 .....	51
2.6.4	时域波形诊断 .....	57
2.6.5	频率特性诊断 .....	57
2.6.6	指纹诊断 .....	57
2.6.7	基于人工神经网络的诊断 .....	58
2.6.8	专家系统在故障诊断中的应用 .....	59
2.7	小结 .....	64
	思考题和讨论题 .....	64
	参考文献 .....	65
<b>第3章</b>	<b>电容型设备的在线监测 .....</b>	<b>68</b>
3.1	概述 .....	68
3.2	测量三相不平衡电流 $\dot{I}_k$ .....	71
3.2.1	工作原理 .....	71
3.2.2	监测线路 .....	72
3.3	介质损耗角正切的监测 .....	74
3.3.1	电桥法 .....	74
3.3.2	相位差法 .....	76
3.3.3	全数字测量法 .....	78
3.4	介质损耗角正切的异频检测 .....	81
3.5	电力电容器的在线监测与故障诊断 .....	81
3.5.1	电力电容器绝缘劣化的诊断 .....	81
3.5.2	局部放电的监测 .....	82
	思考题和讨论题 .....	83

参考文献 .....	84
<b>第4章 避雷器的在线监测与故障诊断 .....</b>	<b>85</b>
4.1 避雷器的故障特点与诊断内容 .....	85
4.2 补偿法测量阻性电流 .....	86
4.2.1 基本原理 .....	86
4.2.2 相间干扰的抑制 .....	88
4.2.3 自然向量补偿法 .....	88
4.3 谐波法测量阻性电流 .....	89
4.3.1 零序电流法 .....	89
4.3.2 三次谐波法 .....	89
4.4 谐波分析法监测阻性电流 .....	90
4.4.1 基本原理 .....	90
4.4.2 监测系统 .....	90
4.5 光电技术在避雷器泄漏电流在线监测中的应用 .....	93
思考题和讨论题 .....	94
参考文献 .....	94
<b>第5章 电力电缆的在线监测 .....</b>	<b>95</b>
5.1 电缆绝缘的劣化和诊断内容 .....	95
5.2 电缆绝缘的在线监测 .....	96
5.2.1 直流法 .....	96
5.2.2 电桥法 .....	100
5.2.3 介质损耗角正切法 .....	101
5.2.4 低频法 .....	101
5.2.5 电缆局部放电的监测 .....	102
5.2.6 综合诊断法 .....	108
5.3 电缆的故障定位 .....	111
思考题和讨论题 .....	113
参考文献 .....	113
<b>第6章 红外监测与故障诊断 .....</b>	<b>115</b>
6.1 红外点温仪 .....	115
6.1.1 红外点温仪的工作原理 .....	115
6.1.2 红外点温仪的分类 .....	116
6.1.3 红外点温仪的技术参数和使用要求 .....	117
6.2 红外热电视 .....	119
6.2.1 红外热电视的基本原理 .....	119
6.2.2 红外热电视的调制 .....	120

6.2.3	红外热电视的技术参数和使用要求	121
6.3	红外热像仪	122
6.3.1	光机扫描红外热像仪	122
6.3.2	焦平面热像仪	124
6.3.3	红外热像仪的图像处理系统	126
6.3.4	红外热像仪的技术参数和使用要求	126
6.4	电气设备的红外检测与诊断技术	129
6.4.1	红外检测的基本要求和影响因素	129
6.4.2	电气设备红外诊断的基本原理和方法	130
6.4.3	红外诊断电气设备故障的内容及应用实例	131
	思考题和讨论题	136
	参考文献	136
<b>第7章</b>	<b>变压器油中溶解气体的监测与诊断</b>	<b>137</b>
7.1	油中气体的产生和溶解	137
7.1.1	气体的产生	137
7.1.2	气体在油中的溶解	138
7.1.3	气体在油中的损失	139
7.2	不同状态下油中气体的含量	140
7.2.1	正常运行的变压器油中气体含量	140
7.2.2	少油设备油中溶解气体含量	141
7.2.3	变压器内部故障类型与油中气体含量关系	142
7.3	油中溶解气体的色谱分析	143
7.3.1	气相色谱分析的流程	143
7.3.2	色谱分析的工作原理	144
7.4	油中溶解气体的现场分析与在线监测	146
7.4.1	脱气方法	147
7.4.2	油中溶解气体现场检测和在线监测装置	150
7.5	油中气体分析与故障诊断	154
7.5.1	故障及其严重程度的判断	154
7.5.2	故障性质的诊断	155
	思考题和讨论题	162
	参考文献	162
<b>第8章</b>	<b>电力变压器的在线监测与诊断</b>	<b>164</b>
8.1	变压器绝缘的劣化及诊断内容	164
8.1.1	局部放电对绝缘劣化的影响	164
8.1.2	水分对绝缘劣化的影响	165

8.1.3	热对绝缘劣化的影响	166
8.1.4	机械应力造成的劣化	168
8.2	变压器局部放电的在线监测	168
8.2.1	局部放电信号的监测	168
8.2.2	监测灵敏度和抗干扰技术	174
8.2.3	放电量的在线标定	178
8.2.4	放电源的定位	180
8.2.5	放电模式识别	186
8.2.6	局部放电在线监测系统	187
8.2.7	变压器局部放电的特高频监测	197
8.3	温度的监测	204
8.4	含水量的监测	204
8.5	变压器寿命的预测	206
8.6	电抗器和互感器的在线监测	208
	思考题和讨论题	209
	参考文献	210
<b>第9章</b>	<b>电机的在线监测与诊断</b>	<b>213</b>
9.1	电机的故障特点与诊断内容	213
9.2	放电的监测	215
9.2.1	放电类型	215
9.2.2	监测灵敏度	216
9.2.3	放电信号传感器和监测方法概述	216
9.2.4	监测系统的组成和抗干扰措施	221
9.2.5	放电源的定位和放电模式识别	225
9.2.6	放电量的标定	228
9.2.7	GenGuard 监测系统特点	228
9.3	微粒的监测	233
9.3.1	烟雾监测器	233
9.3.2	微粒的化学分析	234
9.3.3	气体成分的在线监测	234
9.4	振动的监测	234
9.5	温度的监测	235
9.5.1	局部温度的监测	235
9.5.2	最热点温度的测量	236
9.6	发电机气隙磁通密度监测	236
9.6.1	磁通密度传感器	236
9.6.2	气隙磁通密度分析方法	237

9.6.3	水轮发电机气隙磁通密度在线监测与故障诊断	238
9.7	发电机气隙间距的在线监测	238
9.8	发电机励磁碳刷火花监测	240
9.8.1	火花评定和监测的各种方法	240
9.8.2	紫外光辐射强度监测法原理	241
9.9	发电机轴电压监测	242
9.9.1	轴电压监测的诊断意义	242
9.9.2	轴电压产生的机理	243
9.9.3	轴电压的监测和诊断	243
9.9.4	轴电压和电磁数据采集装置的连接	244
9.10	转子绕组的绝缘电阻和平均温度监测	245
9.10.1	转子绕组的绝缘电阻	245
9.10.2	转子绕组的平均温度	246
9.11	电机寿命的预测	247
	思考题和讨论题	250
	参考文献	250
<b>第 10 章</b>	<b>GIS 和高压断路器的在线监测与故障诊断</b>	<b>252</b>
10.1	概述	252
10.2	高压断路器的监测内容	254
10.3	高压断路器机械故障的监测与诊断	256
10.3.1	断路器合闸、分闸线圈电流监测	256
10.3.2	断路器操动机构行程及速度的监测	259
10.3.3	断路器振动信号的监测	259
10.4	GIS 绝缘故障的监测与诊断	262
10.4.1	电气法监测局部放电	263
10.4.2	机械振动法监测局部放电	264
10.4.3	绝缘故障的诊断	266
10.4.4	干扰的分析与抑制	267
10.4.5	局部放电的特高频监测	268
10.5	SF <sub>6</sub> 气体泄漏的检测	278
10.6	GIL 局部放电的监测	279
	思考题和讨论题	281
	参考文献	281
	常用专业名词	284
	参考文献	291

# 第 1 章

## 概 论

### 1.1 电气设备的绝缘故障及其危害性

电气设备是组成电力系统的基本元件,是保证供电可靠性的基础。无论是大型关键设备如发电机、变压器,还是小型设备如电力电容器、绝缘子等,一旦发生失效,必将引起局部甚至全部地区的停电。

大量资料表明,导致设备失效的主要原因是其绝缘性能的劣化。例如我国 1984—1986 年,110kV 及以上等级电力变压器事故的统计分析表明,由于绝缘劣化引起事故的台次占总事故台次的 68%和总事故容量的 74%<sup>[1]</sup>。而 1990 年的统计分别为 76%和 65%<sup>[2]</sup>。1971—1974 年,我国 6kV 及以上电机事故的统计分析表明,绝缘损坏事故占事故总台次的 66%。1980 年,电力部对 36 台故障电流互感器进行分析,结果是绝缘事故占 92%<sup>[3]</sup>。1990 年,全国 110kV 及以上等级互感器中,绝缘故障占总事故台次的 55%<sup>[2]</sup>。湖北省对 1987 年前发生故障的 22 台电压互感器、45 台电流互感器和 45 只套管的统计分析表明,绝缘故障占总事故台次的比例分别为 86%、69%和 64%<sup>[4]</sup>。1988 年,东北地区对电力电容器损坏情况的统计表明,因绝缘劣化造成的失效约占总失效的 36%<sup>[5]</sup>。

国外的统计结果也类似。例如,北美电力系统曾因绝缘故障引起至少三个电力局的 230kV 电流互感器爆炸。对美国某 4.8kV 配电系统在 1980—1989 年失效电容器的统计分析表明,其中 92%是因绝缘劣化引起失效<sup>[6]</sup>。日本日新公司对故障变压器统计的结果中,绝缘故障占 45%。2003 年 8 月 14 日,发生的北美电力系统大停电,波及美国 8 个州和加拿大 1 个省,估计美国的总损失为 40 亿~100 亿美元,而加拿大 8 月份的国内总产值下降了 0.7%。为研究停电原因和改进措施,成立了美国-加拿大电力系统停电特别工作组。工作组的最终分析报告指出:造成停电的最主要原因是俄亥俄州的地区电力局计算机失效和几条关键的 345kV 输电线对生长过速的树木放电而引起的对地短路事故<sup>[7]</sup>。

由以上论述可见,电气设备的多数故障是绝缘性故障。不仅是电应力作用引起绝缘劣化,导致绝缘故障,而且机械力或热的作用,或者和电场的共同作用,最终也会发展为绝

缘性故障。例如,变压器短路故障产生的巨大电磁力会引起绕组变形,使绝缘受损伤而导致发生匝间击穿;变压器内局部过热可导致油温上升,使绝缘过热而发生裂解,最后发展为放电性绝缘故障。

电力设备,特别是大型设备故障会造成巨大的经济损失。例如,某地区在 1992 年前后发生的三起重大事故中,有两起是由于 220kV 变压器因绝缘故障导致起火,直接损失费用(包括设备损失和电量损失)超过 200 万元,加上由于停电引起的间接损失,总损失约为 500 万元。以一套三相 500kV、360MV·A 的大型变压器为例,若发生绝缘故障,其维修费用当在数百万元,停电一天的直接电量损失(按  $1\text{kW}\cdot\text{h}$  电 0.4 元计)达 280 万元,而因停电引起的间接损失(按  $1\text{kW}\cdot\text{h}$  电产值为 4 元计)可高达 2800 万元。若计入社会损失,例如按我国权威部门指出的直接损失、间接损失和社会损失的比例为 1:4:6 来估计损失,那么它给整个社会造成的损失将更大。

有些非大型设备虽自身价值并不昂贵,但故障后果严重。例如以往互感器、电容器、避雷器常因绝缘故障发生爆炸和起火,不仅会波及邻近设备,且由于故障的突发性,会因爆炸而造成人员伤亡。

鉴于绝缘故障在故障中所占的比重及其后果的严重性,电力运行部门历来十分重视电气设备的绝缘监督。各省、市电力局均设有绝缘监督的专职工程师,上至地区、部,也均有相应的机构、人员管理设备的绝缘监督工作,并规定每年春天对设备进行一次全面的绝缘性能检查。

## 1.2 在线监测与状态维修的必要性及意义

### 1.2.1 预防性维修和试验

对电气设备进行绝缘监督的主要手段,以往一直采用定期进行绝缘预防性试验,即根据电力部所颁发的《电力设备预防性试验规程》,对不同设备所规定的项目和相应的试验周期<sup>[8]</sup>,定期在停电状态下进行绝缘性能的检查性试验。以电力变压器为例,油中溶解气体色谱分析可视变压器的电压、容量每 3(6 或 12)个月进行一次,绕组的绝缘电阻和吸收比测试 1~3 年进行一次,绕组连同套管的泄漏电流测试也是 1~3 年进行一次。

预防性试验一般在每年雷雨季节前的春检时进行。将预试结果和上述规程上的标准进行比较,若有超标,则应安排维修计划对设备进行停电检修,即进行预防性维修<sup>[9]</sup>。

此外,还要根据电力部颁发的电力设备运行规程,按规定的期限和项目对设备进行定期检修。以变压器为例,主变压器在投入运行后的第 5 年和以后每隔 5~10 年大修 1 次<sup>[10]</sup>,在此时间范围内按试验结果确定大修时间。即使预试不超际,到了期限也要进行大修(吊心检修)。预防性维修是一种计划性维修方式。

从上述的预试到维修可统称为预防性维修体系,在我国已沿用 40 多年。这无疑在防止设备事故的发生,保证供电安全可靠方面,起着很好的作用。但长期的工作经验也表明,这样一个维修体系有一定的局限性。

从经济角度看,定期试验和大修均需停电,不仅会造成很大的直接和间接的经济损



失,而且增加了工作安排的难度。加以定期大修和更换部件也需投资,而这种投资是否必要尚不好确定。因为设备的实际状态可能完全不必作任何维修,而仍能继续长时期运行。若维修水平不高,反而可能使设备越修越坏,从而产生新的经济损失。

英国人 P. J. 达夫勒研究了定期检查和维修(计划维修方式)的经济效益问题<sup>[11]</sup>,他认为只有 60% 的维修费用是该花的。而另一种估计则认为,定期维修更换下来的设备中,有 90% 是没有必要更换的。总之,不论怎样估计,这种维修体系都不是最经济的。

从技术角度分析,离线的定期预防性试验有两个方面的局限性。首先,它们的试验条件不同于设备运行条件,多数项目是在低电压下进行检查。例如,介质损耗角正切  $\tan\delta$  是在 10kV 电压下测试的,而设备的运行电压,特别是超高压设备,远比 10kV 要高。并且运行时还有诸如热应力等其他因素的影响,无法在离线试验时再现,这样就很可能发现不了绝缘缺陷和潜在的故障。

其次,虽然绝缘的劣化和缺陷的发展具有统计性,绝缘劣化发展速度有快有慢,但总有一定的潜伏和发展时间。在此期间会发出反映绝缘状态变化的各种信息。而预试是定期进行的,经常不能及时准确地发现故障。第一是漏报,即预试通过后仍有可能发生故障,甚至发生严重事故,例如前述的一台 220kV 变压器爆炸起火事故。该变压器自 1982 年大修后,预防性试验结果一直正常,却在 1999 年底突然爆炸起火烧毁。第二是误报或早报。例如,预试结果虽局部超标,但若故障不进一步发展,可不必马上停电检修,仍可继续运行,只需加强监视即可。若按预防性试验结果马上进行维修,就要耗费停电检修的费用。

### 1.2.2 状态维修和在线监测

20 世纪 70 年代以来,随着世界上装机容量的迅速增长,对供电可靠性的要求越来越高。考虑到原有预防性维修体系的局限性,为降低停电和维修费用,提出预知性维修或状态维修这一新概念。其具体内容是对运行中电气设备的绝缘状况进行连续的在线监测(或称状态监测),随时获得能反映绝缘状况变化的信息。在进行分析处理后,对设备的绝缘状况作出诊断,并根据诊断的结论安排必要的维修,也即做到有的放矢地进行维修。故状态维修应包括三个步骤,即在线监测→分析诊断→预知性维修。

状态维修有以下优点:

- (1) 可更有效地使用设备,提高设备的利用率;
- (2) 降低备件库存量以及更换部件与维修所需费用;
- (3) 有目标地进行维修,可提高维修水平,使设备运行更安全、可靠;
- (4) 可系统地对设备制造部门反馈设备的质量信息,用以提高产品的可靠性。

状态维修的组成及相互关系可用图 1-1 所示的框图来表示。可见在线监测系统是状态维修的基础和根据。当然,为设备建立一套在线监测系统也需要投资,故对某电气设备是否必要建立在线监测系统,应进行经济核算,根据其经济效益来确定。

建立一套在线监测系统需要的投资和设备本身的价值有关。英国人 P. J. 达夫勒认为,对一般工业部门而言,电机的监测系统约是设备费的 5%<sup>[11]</sup>。美国麻省理工学院(MIT)认为,对于单台价值 100 万美元的大型变压器,建立一套完整的监测和诊断系统需