

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 (第2版)

On-line Monitoring and Diagnosis  
for Power Equipment  
(Second Edition)

高胜友 王昌长 李福祺 编著

Gao Shengyou Wang Changchang Li Fuqi

课外借

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 (第2版)

## On-line Monitoring and Diagnosis for Power Equipment (Second Edition)

高胜友 王昌长 李福祺 编著

Gao Shengyou Wang Changchang Li Fuqi

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

电力设备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。本书介绍相关的带电检测、状态监测及故障诊断技术,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,以及局部放电、介质损耗角正切值和油中溶解气体的气相色谱分析等测量方法。着重介绍在线监测技术在发电机、变压器、断路器、互感器和电缆等输变电设备带电检测或在线监测中的应用。同时还介绍了国内外该领域的最新进展。

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,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

电力设备的在线监测与故障诊断/高胜友,王昌长,李福祺编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2018

(清华大学电气工程系列教材)

ISBN 978-7-302-50748-2

I. ①电… II. ①高… ②王… ③李… III. ①电力设备—在线监测系统—故障监测—高等学校—教材 ②电力设备—在线监测系统—故障诊断—高等学校—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 172705 号

责任编辑:许 龙

封面设计:何凤霞

责任校对:王淑云

责任印制:丛怀宇

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.5

字 数:496千字

版 次:2006年3月第1版 2018年10月第2版

印 次:2018年10月第1次印刷

定 价:55.00元

产品编号:072555-01

## 编著者简介

**高胜友**,工学博士,现任清华大学高电压实验室主任。主要从事高电压实验及电力设备的在线监测与故障诊断方面的教学与科研工作。获教育部科技进步二等奖 1 项、湖北省科技进步二等奖 1 项、山东省科技进步三等奖 1 项。发表论文 50 余篇。合作编写教材《电力设备的在线监测与故障诊断》和专著《输变电设备风险评价与检修策略优化》,参编《中国电力百科全书》(第 3 版)和《高电压绝缘技术》(第 3 版)。

**王昌长**,清华大学教授。1954 年毕业于清华大学电机系。长期从事高电压技术、电力设备在线监测、可靠性评估的教学和科研工作。发表论文 50 余篇。主编教材《电力设备的在线监测与故障诊断》,参编专著《电气设备状态监测与故障诊断技术》和《电绝缘诊断技术》等 4 本。两次访问美国南加州大学并参加合作研究。

**李福祺**,清华大学研究员。中国电机工程学会测试技术及仪表专业委员会委员,中国电工技术学会输变电设备专业委员会委员。早年从事发电厂的技术管理工作和高压分压器的研制工作,1989 年以后主要研究电力设备的在线监测和故障诊断。累计完成科研项目 20 余项。曾获省、部级和电力局的科技进步奖共 7 个奖项。在国内外核心期刊和会议上发表论文 30 余篇。

## 清华大学电气工程系列教材编委会

主任 曾嵘

编委 梁曦东 孙宏斌 夏清

肖曦 于歆杰 袁建生

赵伟 朱桂萍

# 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。

大约在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”范畴里先后分划出“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、控制等相关科学和工程技术的专业人才，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、热机学、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

对电力设备进行带电检测、在线监测和故障诊断,是开展设备状态评估和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 40 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 年编写了本书第 1 版的教材。

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,对该教材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,论述了其他一些常用的监测内容,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整体性能的监测有较完整的概念。

本书第 1 版自 2006 年 3 月出版以来,深受广大读者的欢迎。这 10 多年间,带电检测和在线监测技术取得了长足的进步,为了更好地讲述近年来发展的新方法和新技术,对第 1 版的部分内容进行了修订,在内容编排上也进行了一些调整。主要的变化为:①新增了输电线路的监测;②新增了物联网和云技术在在线监测中的应用;③对红外监测进行了必要的简化;④对第 1 版中部分内容进行了调整,补充了一些新技术,删除了一些相对过时的技术和方法;⑤参照新国标对第 1 版中部分符号及表达式进行了修改。

本书共 10 章:第 1 章论述发展在线监测技术的必要性和概况;第 2 章讨论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 3~9 章按照被监测设备类型分别讲述变压器、电容型设备、避雷器、GIS 和高压断路器、电力电缆、输电线路和旋转电机的在线监测和故障诊断技术;



第 10 章介绍物联网和云技术在电力设备在线监测中的应用。

在取材上,本书尽量介绍国内外先进和成熟的技术,同时重视对国内同行单位和本校近 30 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,难以做出结论性判断,需通过实践不断总结和完善。本书由李福祺编写第 1 章,2.3~2.5 节,3.1 节、3.3 节、3.5~3.9 节,第 7 章,9.2.5~9.10 节;高胜友编写 3.2 节,第 4 章,第 5 章,第 8 章和第 10 章;王昌长编写第 2 章的其余各节,3.4 节,9.1~9.2.4 节,9.11 节,第 10 章。全书由高胜友修订并统稿。

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,北京电力科学研究院程玉兰高工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。在此一并致以衷心的感谢。

由于编者学识水平所限,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。

编著者

2017 年 7 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和意义 .....	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 .....	6
思考题和讨论题.....	7
参考文献.....	7
<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 .....	19
2.2.6 电压(电场)传感器 .....	27
2.2.7 气敏传感器 .....	28
2.2.8 湿敏传感器 .....	32
2.3 数据采集系统.....	33
2.3.1 数据的采集 .....	33
2.3.2 信号的传输和传输过程中的干扰抑制 .....	34

2.3.3	光电信号传输通道 .....	36
2.4	抗干扰技术 .....	39
2.4.1	硬件措施 .....	40
2.4.2	软件措施 .....	42
2.5	数据处理 .....	48
2.5.1	时域分析 .....	48
2.5.2	频域分析 .....	48
2.5.3	相关分析 .....	49
2.5.4	统计分析 .....	50
2.6	诊断 .....	50
2.6.1	概述 .....	50
2.6.2	阈值诊断 .....	50
2.6.3	模糊诊断 .....	53
2.6.4	时域波形诊断 .....	58
2.6.5	频率特性诊断 .....	59
2.6.6	指纹诊断 .....	59
2.6.7	基于人工神经网络的诊断 .....	60
2.6.8	专家系统在故障诊断中的应用 .....	61
2.7	小结 .....	65
	思考和讨论题 .....	65
	参考文献 .....	66
<b>第3章</b>	<b>电力变压器的在线监测与诊断 .....</b>	<b>69</b>
3.1	变压器绝缘的劣化 .....	69
3.1.1	局部放电对绝缘劣化的影响 .....	69
3.1.2	水分对绝缘劣化的影响 .....	70
3.1.3	热对绝缘劣化的影响 .....	71
3.1.4	机械应力造成的劣化 .....	73
3.2	变压器油中溶解气体的监测与诊断 .....	73
3.2.1	油中气体的产生和溶解 .....	73
3.2.2	不同状态下油中气体的含量 .....	76
3.2.3	油中溶解气体的色谱分析 .....	79
3.2.4	油中溶解气体的现场分析与在线监测 .....	82
3.2.5	油中溶解气体分析与故障诊断 .....	93
3.3	变压器局部放电的在线监测 .....	103
3.3.1	局部放电信号的监测 .....	103
3.3.2	监测灵敏度和抗干扰技术 .....	113
3.3.3	放电量的在线标定 .....	118
3.3.4	放电源的定位 .....	120
3.3.5	放电模式识别 .....	126

3.3.6	局部放电在线监测系统	127
3.4	温度的测量与监测	135
3.4.1	红外测温	135
3.4.2	变压器绕组热点温度监测	138
3.5	含水量的监测	140
3.6	变压器绕组变形的监测	142
3.6.1	变压器绕组变形产生的原因及危害	142
3.6.2	离线监测方法	143
3.6.3	在线监测方法	143
3.7	变压器有载分接开关的监测	147
3.7.1	转动力矩	147
3.7.2	驱动电动机旋转角度	148
3.7.3	电动机驱动电流	148
3.7.4	振动信号	149
3.8	变压器寿命的预测	149
3.9	电抗器和互感器的在线监测	151
	思考和讨论题	152
	参考文献	153
<b>第4章</b>	<b>电容型设备的在线监测</b>	<b>158</b>
4.1	概述	158
4.2	测量三相不平衡电流 $I_k$	161
4.2.1	工作原理	161
4.2.2	监测线路	162
4.3	介质损耗角正切的监测	164
4.3.1	基于平衡原理的监测方法	164
4.3.2	相位差法	167
4.3.3	谐波分析法	168
4.4	电力电容器的在线监测与故障诊断	171
4.4.1	电力电容器绝缘劣化的诊断	171
4.4.2	局部放电的监测	171
	思考和讨论题	173
	参考文献	173
<b>第5章</b>	<b>避雷器的在线监测与故障诊断</b>	<b>175</b>
5.1	避雷器的故障特点与诊断内容	175
5.2	补偿法测量阻性电流	176
5.2.1	基本原理	176
5.2.2	相间干扰的抑制	177
5.2.3	自然向量补偿法	178
5.3	零序电流法和三次谐波法	178

5.3.1	零序电流法	178
5.3.2	三次谐波法	179
5.4	谐波分析法监测阻性电流	179
5.4.1	基本原理	179
5.4.2	监测系统	180
5.5	光电技术在避雷器泄漏电流在线监测中的应用	182
	思考和讨论题	183
	参考文献	184
<b>第6章</b>	<b>GIS和高压开关设备的在线监测与故障诊断</b>	<b>185</b>
6.1	概述	185
6.2	高压断路器的监测内容	187
6.3	高压断路器机械故障的监测与诊断	189
6.3.1	断路器合闸、分闸线圈电流监测	189
6.3.2	断路器操动机构行程及速度的监测	191
6.3.3	断路器振动信号的监测	192
6.4	GIS绝缘故障的监测与诊断	196
6.4.1	电气法监测局部放电	196
6.4.2	机械振动法监测局部放电	207
6.4.3	绝缘故障诊断	209
6.5	SF <sub>6</sub> 气体特性的监测	212
6.5.1	SF <sub>6</sub> 气体密度的监测	212
6.5.2	SF <sub>6</sub> 微水的监测	213
6.5.3	SF <sub>6</sub> 泄漏的监测	214
6.5.4	SF <sub>6</sub> 分解组分监测	215
6.6	高压开关柜的在线监测	218
6.6.1	高压开关柜温度的监测	218
6.6.2	开关柜局部放电监测	219
6.7	GIL局部放电的监测	220
	思考和讨论题	222
	参考文献	223
<b>第7章</b>	<b>电力电缆的在线监测</b>	<b>226</b>
7.1	电缆绝缘的劣化和诊断内容	226
7.2	水树枝的在线监测	227
7.2.1	直流法	227
7.2.2	电桥法	231
7.2.3	介质损耗角正切法	232
7.2.4	低频法	232
7.3	电力电缆局部放电的监测	233
7.3.1	电缆局部放电的监测方法	233

7.3.2 干扰的抑制方法	240
7.4 电力电缆的故障诊断	243
7.5 电缆的故障定位	245
思考和讨论题	247
参考文献	247
<b>第8章 输电线路的监测</b>	<b>250</b>
8.1 输电线路绝缘子污秽在线监测系统	250
8.1.1 泄漏电流监测与分析	250
8.1.2 绝缘子电晕放电的检测	256
8.1.3 等值附盐密度在线监测技术	257
8.2 导线温度在线监测	258
8.3 输电线路覆冰雪在线监测	259
8.3.1 图像监测法	259
8.3.2 称重法	259
8.3.3 倾角法	260
8.4 输电线路导线舞动监测	260
8.4.1 图像处理技术	261
8.4.2 加速度传感技术	261
8.4.3 光纤传感技术	262
思考题和讨论题	262
参考文献	262
<b>第9章 电机的在线监测与诊断</b>	<b>264</b>
9.1 电机的故障特点与诊断内容	264
9.2 放电的监测	265
9.2.1 放电类型	265
9.2.2 监测灵敏度	266
9.2.3 传感器和监测方法概述	267
9.2.4 监测系统的组成和抗干扰措施	272
9.2.5 放电源的定位和放电模式识别	276
9.2.6 放电量的标定	278
9.2.7 GenGuard 监测系统特点	279
9.3 微粒的监测	283
9.3.1 烟雾监测器	283
9.3.2 微粒的化学分析	284
9.3.3 气体成分的在线监测	284
9.4 振动的监测	284
9.5 温度的监测	285
9.5.1 局部温度的监测	285
9.5.2 最热点温度的测量	286

9.6	发电机气隙磁通密度监测 .....	286
9.6.1	磁通密度传感器 .....	286
9.6.2	气隙磁通密度分析方法 .....	287
9.6.3	水轮发电机气隙磁通密度在线监测与故障诊断 .....	287
9.7	发电机气隙间距的在线监测 .....	288
9.8	发电机励磁碳刷火花监测 .....	289
9.8.1	火花评定和监测的各种方法 .....	290
9.8.2	紫外光辐射强度监测法原理 .....	290
9.9	发电机轴电压监测 .....	291
9.9.1	轴电压监测和诊断的意义 .....	291
9.9.2	轴电压产生的机理 .....	292
9.9.3	轴电压的监测和诊断 .....	292
9.9.4	轴电压和电磁数据采集装置的连接 .....	293
9.10	转子绕组的绝缘电阻和平均温度监测 .....	294
9.10.1	转子绕组的绝缘电阻 .....	294
9.10.2	转子绕组的平均温度 .....	295
9.11	电机寿命的预测 .....	296
	思考和讨论题 .....	298
	参考文献 .....	299
<b>第 10 章</b>	<b>物联网技术和云计算的应用 .....</b>	<b>301</b>
10.1	物联网技术 .....	301
10.1.1	智能感知层 .....	301
10.1.2	数据通信层 .....	304
10.1.3	信息整合层 .....	306
10.1.4	智能应用层 .....	306
10.2	云平台 .....	306
10.2.1	开源平台 .....	307
10.2.2	商业化平台 .....	308
	思考题和讨论题 .....	309
	参考文献 .....	309

# 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、变压器等,还是小型设备如电力电容器、绝缘子等,一旦发生失效,都可能引起局部甚至全部地区的停电。

大量资料表明,绝缘劣化是导致设备失效的主要原因之一。例如,2002—2005年间,国家电网公司系统 110kV 及以上等级电力变压器事故统计分析表明,绕组、主绝缘和引线等处绝缘是变压器发生事故的主要部位。各个电压等级的纵绝缘和主绝缘事故占总事故的比例达到了 78.6%<sup>[1-3]</sup>。根据 1998 年 1 月—2003 年 3 月京津唐电网在役 100MW 以上发电机的故障、障碍和缺陷的统计结果,包括定子绕组端部手包绝缘、转子绕组匝间短路在内的绝缘缺陷所占比例高达 75%<sup>[4]</sup>。2000—2001 年全国共发生了 7 台次 500kV 电流互感器在正常运行电压下的绝缘击穿事故,包括油浸电容型 3 台次、油浸倒置型 2 台次和 SF<sub>6</sub> 气体绝缘型 2 台次<sup>[5,6]</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 只套管的统计表明,绝缘故障占总事故台次的比例分别为 86%、69%和 64%<sup>[7]</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>[8]</sup>。日本日新公司对故障变压器的统计结果中,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引起的对地短路事故<sup>[9]</sup>。

可见电气设备故障中绝缘性故障占有很大的比例。其原因是电气设备的绝缘在运行中受到电场、热、机械应力、环境等多种因素的作用,其内部发生复杂的物理或化学变化,造成性能逐渐劣化而导致绝缘故障。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。以一台三相500kV、360MV·A的大型变压器为例,若发生绝缘故障,其维修费用应当在数百万元,停电一天的直接电量损失(按1kW·h电0.4元计)达280万元,而因停电引起的间接损失(按1kW·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故障后果的严重性,电力运行部门历来十分重视电气设备的绝缘监督。各省、市电力公司均设有绝缘监督的专职工程师,上至总公司,也均有相应的机构和人员来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和意义

### 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,以往一直是采用定期进行绝缘预防性试验,即根据《电力设备预防性试验规程》,针对不同设备所规定的项目和相应的试验周期<sup>[10,11]</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中的标准进行比较,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>[12]</sup>。

此外,还要根据电力设备运行规程,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>[13]</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(吊芯检修)。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,其在我国已沿用了40多年。该维修体系无疑在防止设备事故的发生和保证供电安全可靠方面起到了很好的作用。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,不仅要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。此外,定期大修和更换部件也需要投资,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。