



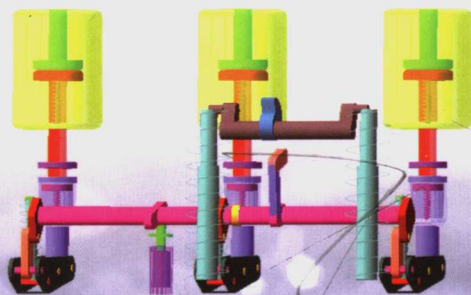
CONDITION MONITORING

OF SWITCHGEAR

DIANQI
XINXILEI

电气设备状态检测

■ 荣命哲 贾申利 王小华 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



TM507

2

2007

电器设备状态检测

荣命哲 贾申利 王小华 编著



机械工业出版社

电器设备是电力系统中最重要控制和保护设备。电器设备状态检测是对电器设备经济安全运行评估的基础,是融合传统电器、传感器技术、自动控制、信号处理等多学科知识的前沿研究方向之一。

本书共 11 章,包含 4 部分内容:电器设备状态检测的重要性及电器设备状态劣化规律的描述;电器设备状态特征量信号的提取、信号传输与数据通信;电器设备检测系统的设计;低压电器设备电接触性能参数的提取与性能检测方法等。

本书适于电器设备的设计研究人员阅读,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电器设备状态检测/荣命哲,贾申利,王小华编著.
北京:机械工业出版社,2007.6
ISBN 978-7-111-21640-7

I. 电… II. ①荣…②贾…③王… III. 电气设备-检测-高等学校-教材 IV. TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 085992 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:于苏华 版式设计:张世琴 责任校对:张莉娟
封面设计:张静 责任印制:洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2007 年 7 月第 1 版 · 第 1 次印刷
184mm×260mm · 15.5 印张 · 381 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-21640-7
定价:24.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294
购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话:(010) 88379711
封面无防伪标均为盗版

前 言

电器设备是电力系统中最重要控制和保护设备，其主要作用是能接通、承载及分断正常电路条件下的电流，也能在规定的非正常电路条件（例如短路）下接通、承载一定时间和分断电流。电器设备的工作性能对于提高电力系统的安全性和经济性具有极其重要的意义。

有关电器设备的研究工作包括3个层次，分别是电器设备的基础理论、电器设备的设计方法及电器设备的经济安全运行评估。本书的主题围绕电器设备的状态检测，属于电器设备经济安全运行评估的基础。

电器设备状态检测融合传统电器、传感器技术、自动控制、信号处理等多学科的知识，是电器学科的前沿研究方向之一。鉴于此，西安交通大学电器教研室近年来在电器设备的状态检测领域进行了大量深入、系统的研究工作。本书就是以这些研究工作成果为基础，并力图反映近年来国际上的有关研究成果和发展动态而完成的，全书共分11章，包含4部分内容。

第一部分为电器设备状态检测的重要性及电器设备状态劣化规律的描述，由第1章、第2章组成。在第1章综述电器设备状态检测的必要性及国内外研究现状的基础上，第2章研究电器设备温升特性、机械特性和绝缘特性的劣化规律，并重点介绍了通过对电器设备机构动力学特性进行仿真分析，把握机械系统行为及故障发生、发展机理的新方法。其内容包括多体动力学及多体动力学仿真软件包ADAMS的功能特点描述、利用ADAMS软件包建立的断路器机构动力学模型、在所建立模型的基础上对断路器短路开断和关合过程的模拟及断路器操动机构主要机械故障的仿真分析，以及短路电流所产生的电动力对断路器机械特性的影响。

第二部分为电器设备状态特征量信号的提取、信号传输与数据通信，由第3章~第6章组成。电器设备的运行状态可以通过一些特征物理量来反映，例如母线连接处的温升可以反映母线的连接状态、环氧绝缘套管的表面泄漏电流可以表征其绝缘性能、主轴角位移可以表征机构操作特性、振动信号可以表征开关触头的动作特性等。电器检测的核心内容之一就是如何将这些特征量信号在比较恶劣的电磁环境下准确地提取出来。信号提取一般包括信息捕获、信号调理和传输等过程，其中，信息捕获是信号提取最前沿的阵地，所使用的传感器技术对信号提取的可靠性和准确性起着决定性作用。同时，电器设备运行于高电压、强电流的环境下，信号的现场提取所使用的传感器、调理电路和传输介质等都必须具有良好的电磁兼容性能。本部分主要针对电器设备的环氧绝缘套管绝缘信号、母线温升信号、机械特征信号的提取方法进行讨论，而且特别地从时域、频域和时频分析出发，探讨了几种实用的非平稳振动信号特征参量提取方法及它们在电器设备检测中的应用，并简要介绍其他一些状态特征量信号的提取方法。在本部分中，针对电器设备检测中信号传输的常用方法，介绍了红外传输技术，射频传输技术，另外，还介绍了电器设备检测中常用的几种现场总线通信技术，结合电器设备分布式检测系统，描述了上位机和下位机通信单元的设计方法。

第三部分为电器设备检测系统的设计,由第7章~第9章组成。其中,第7章针对电器设备的故障诊断需求,从故障诊断专家系统的组成、推理机制及实现方法等方面讨论了电器设备检测系统中的故障诊断专家系统,并给出了基于神经网络的电器设备故障诊断专家系统实例;考虑到电器设备检测系统工作于恶劣的电磁环境下,第8章论述了检测系统设计中软件和硬件方面应采取的抗干扰措施及原理,简要介绍了基于Ansoft的电磁兼容性能仿真分析;第9章重点介绍了电器设备检测系统中常用的一些技术,包括典型的特征信号前处理(隔离、滤波、放大、 V/F 转换等技术)、人机交互界面、MCU及最小系统。

第四部分主要针对低压电器设备展开,由第10章和第11章组成。这部分内容从影响电触头电寿命的关键因素、电触头在电弧作用下的失效机理、电弧电压和电弧电流等参数的信号提取方法、电触头接触电阻的测量方法、电触头熔焊力的测量方法等方面,全面论述了低压电器电接触性能的测试,并给出了电接触性能测试装置的软件结构和硬件结构;最后简述了接触器相关特性和低压断路器保护特性的测试原理。

本书第1章、第2章、第3章、第9章和第10章由荣命哲编著,第5章和第6章由贾申利编著,第4章、第7章、第8章和第11章由王小华编著。在编写过程中,引用了作者指导的多位博士研究生和硕士研究生学位论文的研究成果,在此表示感谢。同时也引用了国内外同行的相关文献,特此致谢!

感谢“电力设备电气绝缘国家重点实验室”对本书完成过程中给予的支持。

由于水平有限,书中不当之处甚至错误在所难免,敬请读者指正。

编著者

目 录

前言

参考文献 49

第1章 绪论	1
1.1 电器设备状态检测研究的必要性	1
1.1.1 高压电器设备状态在线检测研究的必要性	1
1.1.2 低压电器设备状态检测研究的必要性	2
1.2 电器设备状态检测的研究现状	3
1.2.1 高压电器设备状态检测研究现状	3
1.2.2 低压电器设备状态检测研究现状	6
1.3 电器设备状态检测领域中的关键技术	8
参考文献	9

第2章 电器设备状态劣化规律研究	13
2.1 电器设备的劣化类型	13
2.2 绝缘劣化规律的理论研究与试验研究	15
2.2.1 绝缘劣化规律的理论分析	15
2.2.2 绝缘劣化规律的试验研究	16
2.3 机械特性劣化规律的仿真研究	18
2.3.1 多体动力学概述	19
2.3.2 ADAMS 软件包简介	19
2.3.3 VSI 型真空断路器操动机构仿真分析	20
2.3.4 真空断路器动触头所受短路电流电动力分析	24
2.3.5 高压断路器操动机构故障状态仿真分析	38
2.3.6 主轴角位移行程曲线的参数化描述	47

第3章 电器设备状态特征量信号的现场提取	51
3.1 环氧绝缘套管绝缘劣化规律及泄漏电流信号的现场提取	51
3.1.1 环氧绝缘套管绝缘特性的劣化规律	51
3.1.2 环氧绝缘套管绝缘特性劣化判据的实验确定	52
3.1.3 使用引流环的泄漏电流信号的现场提取	53
3.2 电连接状态劣化原理及温度信号的现场提取	54
3.2.1 电连接状态劣化的影响因素	55
3.2.2 现有的电连接处温度信号现场提取方法简介	55
3.2.3 基于红外辐射原理的测温模块	58
3.2.4 基于红外传输的接触式测温模块	62
3.3 断路器机械状态参量的现场提取	69
3.3.1 断路器机械状态的主要特征参量	69
3.3.2 二次绕组电流信号的现场提取	72
3.3.3 动触头位移信号的现场提取	73
3.3.4 断路器三相分(合)闸同期性的现场提取	74
3.4 其他一些状态信号的现场提取方法	77
3.4.1 电器设备内部弧光信号的现场提取	77

3.4.2 SF ₆ 气体状态特征量的 现场提取	78	5.3 时频分析方法	120
3.4.3 GIS 局部放电信号的 现场提取	79	5.3.1 小波变换和小波包变换	120
3.4.4 真空灭弧室的真空度信号 现场提取	80	5.3.2 小波包频带能量分解在断路器振动 信号分析中的应用	123
参考文献	82	5.3.3 利用小波包分解对断路器振动信号 进行去噪处理	126
第4章 电器设备在线检测系统 的通信技术	84	参考文献	127
4.1 分布式在线检测系统通信类型	84	第6章 信号传输方式的研究	129
4.1.1 RS-232/485 通信接口	85	6.1 基于光纤技术的信号传输方式	129
4.1.2 现场总线	86	6.1.1 光纤通信特点	129
4.1.3 以太网	89	6.1.2 光纤通信系统构成	129
4.2 工作模式和通信协议	89	6.1.3 实验结果及分析	130
4.2.1 工作模式	89	6.2 基于红外技术的信号传输方式	131
4.2.2 通信协议	90	6.2.1 红外信号传输系统的构成	131
4.3 分布式在线检测系统通信 方案的选择	94	6.2.2 红外技术应用原理图	131
4.3.1 系统通信的需求分析	94	6.2.3 红外信号传输的实验测试	131
4.3.2 通信方案选择及评价	95	6.3 基于射频技术的信号传输方式	133
4.3.3 RS-485 通信接口和 CAN 总线应用 时的注意事项	96	6.3.1 射频技术原理	133
4.4 分布式检测系统的设计	97	6.3.2 射频传输方案设计	133
4.5 上、下位机通信模块的软、 硬件设计方法	97	参考文献	137
4.5.1 下位机通信模块硬件的设计	97	第7章 电器设备故障诊断 专家系统	138
4.5.2 上位机通信模块硬件的设计	99	7.1 专家系统框架的构建	138
4.5.3 下位机通信软件的设计	100	7.2 专家系统知识库的建立	140
4.5.4 上位机通信软件的设计	103	7.3 专家系统的推理机制	143
参考文献	105	7.4 专家系统数据库及配置	146
第5章 电器设备非平稳振动信号 的特征参量提取	106	7.4.1 数据库	146
5.1 时域分析方法	106	7.4.2 配置系统	147
5.1.1 欧氏距离法	106	7.5 专家系统故障诊断模型	147
5.1.2 积分参数法	110	7.6 基于神经网络的专家系统 故障诊断实例	147
5.1.3 信号熵法	113	参考文献	154
5.1.4 短时能量法	115	第8章 电器设备在线检测中的 电磁兼容问题	155
5.2 频域分析方法	118	8.1 电磁兼容原理及技术发展	155
		8.2 抑制电磁干扰的措施及原理	157

8.3 在线检测系统的电磁兼容设计	162	在触头电接触现象方面的 研究现状	196
8.3.1 电源系统的抗干扰设计	162	10.1.1 触头在电弧作用下的 失效机理	197
8.3.2 硬件电路的抗干扰设计	163	10.1.2 触头电接触现象的 研究方法	198
8.4 软件中的抗干扰设计	168	10.2 触头电接触参数的测量	199
8.5 基于 Ansoft 的电磁兼容 性能仿真分析	168	10.2.1 接触电阻的测量	199
8.5.1 Ansoft Designer 模块	168	10.2.2 接触压力与熔焊力的测量	204
8.5.2 Ansoft HFSS 模块	169	10.2.3 电弧参数的测量	205
8.5.3 Ansoft Siwave 模块	170	10.3 触头电接触性能测试系统设计	209
8.5.4 Ansoft 应用实例	171	10.3.1 系统结构及硬件构架	209
参考文献	174	10.3.2 系统软件设计	214
第 9 章 电器设备状态在线检测		参考文献	219
应用实例	175	第 11 章 接触器特性和低压断路器保护	
9.1 典型的特征信号前处理	175	特性的测试原理	220
9.1.1 信号隔离技术	175	11.1 试验分类	220
9.1.2 信号滤波技术	178	11.1.1 型式试验	220
9.1.3 信号放大技术	181	11.1.2 常规试验	221
9.1.4 V/F 转换	182	11.1.3 抽样试验	221
9.2 人机交互界面	185	11.1.4 特殊试验	221
9.2.1 下位机界面	186	11.2 接触器特性试验原理	222
9.2.2 上位机界面	190	11.2.1 接触器特性介绍	222
9.3 MCU 及最小系统	190	11.2.2 接触器型式试验和 特殊试验介绍	223
9.3.1 单 MCU 系统及外设	190	11.3 低压断路器保护特性的测试原理	235
9.3.2 双 MCU 系统及外设	192	11.3.1 低压断路器的保护特性	236
参考文献	195	11.3.2 低压断路器的保护特性测试	237
第 10 章 触头电接触性能测试		参考文献	239
原理及应用	196		
10.1 触头在电弧作用下的失效机理及国内外			

第 1 章 绪 论

高压电器设备是电力系统非常关键的设备，如果在运行的过程中发生了故障又得不到及时的处理，将有可能给电网运行带来严重危害。因此，可以说高压电器设备运行的可靠性直接关系到电力系统的安全运行。加强对高压电器设备各种故障的检测，提前发现潜在故障，对降低电力系统的运行成本、提高电力系统的安全性和可靠性具有非常重大的意义。

低压电器设备主要应用于低压配电系统，起控制、保护等作用。对低压电器设备开展产品出厂状态检测，有助于提高相关产品出厂时的质量，从而对提高我国低压配电系统的安全运行具有重大的意义。

1.1 电器设备状态检测研究的必要性

1.1.1 高压电器设备状态在线检测研究的必要性

随着我国经济建设的发展，电力系统的容量日益增长，覆盖范围越来越广，电力系统的安全可靠运行越来越显著地影响国民经济的发展和社会的安定团结。2005 年我国累计装机容量达到 508GW，预计到 2020 年，我国累计装机容量将达到 1000GW，成为世界上最大规模的联合电力系统。在 2004 年举行的国际大电网会议上，国际能源机构执行主席 C. Mandil 提供的信息表明，2001 ~ 2030 年间全球输、配电投资将达 53230 亿美元。据高压开关协会 2005 年统计资料，2004 年我国高压开关工业增加值与 2003 年相比增长 23.42%。

以高压开关设备为例，近十年的统计数字表明，每次高压开关设备事故平均损失电量达数百万千瓦时，它所造成的损失为其本身价格的数千倍甚至数万倍。因此，从运行上来说，电力系统要求安全第一。

高压电器设备的检修经过了 3 个发展历程：第一阶段，是运行中的设备出现了故障时才退出运行，进行维修，是一种坏了才修，不坏不修的检修方式，人们称之为“事故检修”（Breakdown Maintenance）。这种检修方式纯粹是为了使发生故障的高压电器设备能够再次投入运行而实施，不能改善电力系统运行的安全性和可靠性。第二阶段，发展为“定期检修”（Time-based Maintenance），就是为了减少设备损坏，预防设备故障，事先拟出定期检修计划，到了计划规定的检修周期，必须对设备进行检修。这种方法可以通过定期检验发现高压电器设备存在的潜伏故障，有助于提高高压电器设备运行的可靠性。在我国的电力行业中，目前高压电器设备的维护基本上采取定期检修制度，这种制度为保证高压电器设备正常工作确实起到了预防或延迟故障的作用。但是定期检修存在较大的缺陷：一是有可能高压电器设备还未达到规定的检修周期就发生了故障，造成不足维修；二是当定期检验周期到时，高压电器设备仍处于稳定工作状态，此时对其进行维修，不但造成不必要的停电损失和人力、物力、财力的浪费，而且由于维修人员的素质参差不齐，反而会降低高压电器设备的运行可靠性。第三阶段，即 20 世纪 50 年代美国 GE 公司提出所谓的“预知检修”（Predictive Maintenance）的思想，它强调以设备状态为基准进行检修，后来这种思想被称为“状态检修”

(Condition-based Maintenance)。它是在高压电器设备运行过程中或在基本不拆卸的情况下,采用各种测量、分析和判断方法,结合高压电器设备的历史状况和运行条件,诊断高压电器设备当前运行状态,然后根据诊断的结果有针对性地进行检修。目前,我国电力系统部分运行单位已经开始实施高压电器设备的状态检修,并开始致力于变定期检修为状态检修,不再以投运年限为标准来判断高压电器设备的寿命情况,而是以高压电器设备的实际运行数据为维修依据,对高压电器设备进行状态在线检测的研究为实现由定期检修到状态检修创造了非常有利的条件。相对于定期检修,状态检修方式具有如下优点:

- 1) 避免电力系统不必要的停电。
- 2) 减少设备因维修造成的损害。
- 3) 减少因设备维修不当所造成的事故。
- 4) 减少因设备维修所需的人力、物力和财力。

采用在线检测技术,能够根据高压电器设备的实际运行状态及时进行维修,有效地扩大维修周期,节省维修费用。

由于具有上述显著优点,状态检修对于节省人力、物力,避免设备故障及事故的发生和发展,有效提高高压电器设备运行的可靠性,确保电力系统稳定性都有很重要的意义。例如美国 Consolidated Electric, Inc. 公司研制的 SM6 系列断路器(高压电器设备的元件)在线检测系统和瑞士 ABB 公司研制的 GIS 在线检测系统,都已经应用并取得良好的经济效益。在我国,在线检测技术越来越广泛地得到各科研单位和电力运行部门的关注。在我国召开的电机工程学会高压电器分专委会'97 学术会议上,与会专家认为,由于供电连续性和可靠性的要求,定期检修是不合适的,状态检修是高压电器设备检修的发展方向;目前的状态检修多依靠经验和感觉,科学性不够,应该对主要性能参数开展有效的在线检测技术的研究,制定控制指标,以提高状态检修的科学性。1997 年在柏林召开的 IEEE/PES 会议上,有关专家指出高压电器设备在线检测已经成为电力工业急需发展的一项新技术。

1.1.2 低压电器设备状态检测研究的必要性

低压电器设备主要应用于低压配电系统,起控制、保护等作用。对低压电器设备开展产品出厂状态检测,有助于提高相关产品出厂时的质量,从而对提高我国电力系统的安全运行具有重大的意义。本书所述低压电器设备状态检测主要包括电接触测试、接触器测试、低压断路器保护特性测试 3 方面内容。

电触头是低压电器中的关键元件,担负着接通与分断电流的任务,它直接影响开关、电器运行的可靠性及使用寿命,所以人们将电触头称为电器的“心脏”。现代化的大型复杂电器系统,如大型电力系统、自动控制系统、通信系统等,其中包含的电触头数目常在数十万以上,如果其中的一个或几个工作失效,则将导致整个系统紊乱,甚至完全瘫痪,它所造成的严重后果将是无法估计的。无论是核聚变工程的保护开关、人造卫星上的继电器,还是大型电子计算机中的连接器、现代化工业控制系统中的控制电器等设备,都需要使用电触头。这些现代化的系统需要极高的可靠性,尤其是在军事、航天、航空等领域,对带触头电器的可靠性及寿命都提出了非常苛刻的要求。因此,世界各先进工业国家如美、德、日、法和英等国都十分重视电触头材料的研究。

如何对触头的寿命及可靠性等参数做出准确的、科学的评价一直是人们研究的课题。要对触头的电接触性能进行比较全面的考察,需要全面测试对触头电接触性能影响较大的参

数。触头电接触参数主要包括：触头间接触电阻、接触压力、熔焊力、电弧电流、电弧电压、燃弧时间。因此，为提高电器触头的可靠性，对触头的电接触参数进行测试具有重要的意义。

接触器用途广泛、品种繁多，适用于远距离频繁的接通和分断主电路及大容量控制电路。交流接触器主要用于控制交流感应电动机的各种运行方式，也可用于控制其他电力负载，如电热器、电照明器具、电焊机、电容器组。直流接触器主要用于控制直流电动机，直流电磁铁，也可用于控制其他直流负载，如电照明器具、电加热器具。接触器新产品在设计完成投入批量生产前，必须对产品各类技术指标，如结构、安全、动作寿命、通断非正常电流及承载过载电流的能力等进行验证，看是否达到有关标准和技术条件的要求，这就需要进行型式试验。根据 GB14048.4—1993《低压开关设备和控制设备 机电式接触器和电动机起动器》中检验规则规定，接触器型式试验的试验项目有以下 26 种：①弹性部件耐老化试验；②耐湿、耐热性能试验；③抗非正常热和着火危险试验；④抗锈性能试验；⑤绝缘材料相比漏电起痕指数试验；⑥外壳防护等级试验；⑦接线端子机械性能试验；⑧安装螺钉和螺母的机械强度试验；⑨耐撞击试验；⑩泄漏电流的测定；⑪低温和高温试验；⑫温升试验；⑬介电性能试验；⑭一般检查；⑮电气间隙和爬电距离的测量；⑯噪声试验；⑰动作范围的验证试验；⑱额定接通和分断能力试验；⑲约定操作性能试验；⑳电寿命试验；㉑机械寿命试验；㉒耐受过载电流能力试验；㉓与 SCPD 协调配合试验；㉔辅助触头的通断能力试验；㉕辅助触头的电寿命试验；㉖辅助触头额定限制短路电流试验。接触器机械特性参数主要有触头的开距、超程、初压力、终压力 and 三相主触头同步差等，上述参数对接触器性能有着极其重要的影响，因此对机械特性参数进行检测十分必要。

低压断路器（曾称自动开关）相当于刀开关、熔断器、热继电器和欠电压继电器的组合，是一种既有手动开关作用又能自动进行欠电压、失电压、过载和短路保护的电器。低压断路器不仅可以接通和分断正常负载电流、电动机工作电流和过载电流，而且可以接通和分断短路电流。它在电路中主要起短路和过载保护作用，还具有欠电压保护和远距离分断电源等功能，也可直接操作不频繁起动电动机和电路转换等。低压断路器的型式种类繁多，但基本结构和工作原理基本相同，主要由 3 个基本部分组成，即触头和灭弧系统；各种脱扣器，包括过电流脱扣器、失电压（欠电压）脱扣器、热脱扣器和分励脱扣器；操作机构和自由脱扣机构。低压断路器的特性检验是低压断路器研究与制造很重要的一个方面，它对电器产品的特性研究、保证出厂产品的质量都有重要的意义。

1.2 电器设备状态检测的研究现状

1.2.1 高压电器设备状态检测研究现状

1. 国外的研究工作

国际大电网会议 CIGRE 第 13.06 工作组共进行了两次高压开关设备的可靠性调查：

第一次调查是 1971 ~ 1985 年 15 年间的高压开关设备可靠性。

第二次调查从 1988 年 1 月 ~ 1991 年 12 月 31 日止，主要针对单压 SF₆ 断路器。

调查高压开关设备的可靠性同时，还研究了诊断技术。研究结果认为：

1) 操动机构引起的高压开关设备故障比率最高，如下令后拒分、闭锁等。在这方面使

用诊断技术以提高高压开关设备的可靠性是最重要的。

- 2) 电气击穿故障也较严重,应当鼓励在电气绝缘领域开发和使用诊断技术。
- 3) 关合和开断电流方面的故障很少发生,似乎无理由去开发和使用诊断技术。

2001年,国际电气电子工程师协会开关设备委员会出台了C37.10.1标准:断路器检测指导原则。该标准指出,断路器检测方法应分为5个步骤:

- 1) 故障类型和故障影响分析。
- 2) 确定正确的检测对象来发现最可能发生的故障。
- 3) 对设备可能发生的故障进行风险分析。
- 4) 采用成本-利益分析来明确是采用在线检测还是周期检测。
- 5) 制定决策。

该标准指出:SF₆断路器的检测包括以下3个方面:工作电压下的各组件的检测,包括SF₆气体密度和压力、触头温度的红外检测、触头磨损的检测;控制电路和辅助电路的检测,包括分、合闸线圈电流的检测及辅助触头状态的检测;操动机构的检测,包括储能电机电流、机构运动情况、机构温度的检测。

该标准指出:油断路器的检测包括以下3个方面:工作电压下的各组件的检测,包括绝缘套管的检测、油状况的周期性检测、套管温度的红外检测、触头磨损的检测;控制电路和辅助电路的检测,包括分、合闸线圈电流的检测及辅助触头状态的检测;操动机构的检测,包括压缩机电流、机构运动情况、油压状况的检测。

近年来,国外许多公司、大学和研究机构对高压开关设备的机械特性、绝缘和灭弧介质特性、振动信号、电寿命等方面进行了研究。

(1) 机械特性状态在线检测 德国ESKOM公司的Martin H. B.结合ESKOM公司服役断路器遇到的具体问题,认为断路器故障主要是由操动机构的故障引起的,并对断路器分、合闸线圈电流、动触头行程曲线及操作过程中触头动态电阻进行了测量。美国Texas A&M大学提出了自动检测和分析断路器操作情况的方法:用便携式的示波器纪录断路器控制电路(分、合闸线圈)电流波形,采用小波变换对波形进行去噪处理,然后使用专家系统对断路器操作情况进行诊断;并开发了离线和在线状态下的应用软件。巴西Sao Paulo大学M. S. Silva, J. A. Jardini使用数字示波器采集三相相电流,并用小波变换对三相相电流进行分析,结合分、合闸线圈电流计算出断路器操作时间。英国Bath大学的Philip J. Moore利用断路器动作时,电弧辐射出高频电磁波的特点,使用天线接收电弧产生的脉冲射频信号,并对该信号进行分析从而得到断路器分、合闸时间。英国利物浦大学J. Cosgrave等人采用多通道光纤传感技术对油断路器进行检测,通过对断路器动作时灭弧室不同位置的光强进行检测,计算出燃弧时间、触头行程,并可观测出油的扰动和溅射情况。

(2) 绝缘和灭弧介质特性的在线检测 Alstom公司最新开发的CBWatch-2型断路器在线检测与诊断装置,应用于245kV SF₆断路器,可以在线计算SF₆气体密度、SF₆气体泄漏率、弹簧操动机构的分合闸操作时间、触头电寿命,并采用RS-485、MODBUS、MODEM多种方式进行通信。德国Ppilzecker提出采用光谱分析技术对GIS(气体绝缘开关柜)隔离室内的气体进行光谱分析,得出气体组成成分及含量,从而达到对绝缘故障检测的目的。

(3) 振动信号检测与分析 澳大利亚Monash大学Dennis S. S. Lee等人综合运用小波包技术和神经网络技术对断路器合闸振动信号进行分析从而对断路器进行故障诊断。这种方法

首先对正常振动信号和故障振动信号分别进行小波包分解,然后将断路器状态敏感的分解系数输入神经网络进行故障诊断。意大利罗马大学 Giuseppe Fazio 等人应用连续小波变换对断路器操作时的振动信号进行处理,得到正常状态和故障状态时振动信号的频率特性,并结合统计学方法对断路器进行故障诊断和状态识别。

(4) 高压开关设备电寿命在线检测 英国 Basler 电气公司 Gerald Dalke 根据断路器分断电流和电弧能量的大小来评估断路器触头的磨损状况,并提出计算断路器分断额定电流和短路电流时触头磨损的计算公式。澳大利亚 Queensland University of Technology 通过测量断路器负载测电流互感器的电流和电压,在线检测分/合闸时刻、燃弧时间、电弧电压、电弧能量、触头电寿命。

2. 国内的研究工作

我国的高压电器设备状态在线检测技术起始于 20 世纪 80 年代,在 20 多年时间里得到了迅速的发展。各单位相继研制出了不同类型的检测装置,主要有各省电力部门研制的电容性设备的检测装置(主要检测介质损耗、电容值、三相不平衡电流);电力系统的一些研究所的电容性设备的检测,以及各种类型的局部放电检测系统。同时,国内一些高校则开始了绝缘诊断技术的研究。国家先后将一些诸如:“断路器运行中局部放电数字化检测装置和相应的微机系统”、“大型气轮发电机故障在线检测系统”项目列入国家攻关项目。随后,原机械部、电力部也先后将诸如:“大电机绝缘在线检测技术的研究”、“在线局部放电抗干扰”列入重大科技项目。这些,都标志着我国的高压电器设备状态检测技术进入了全速发展阶段。近年来,高压电器设备状态在线检测技术得到了长足的发展,许多高校和研究机构针对各种高压电器设备的状态在线检测进行了研究,并开发出一系列产品。研究的重点主要集中在高压电器设备机械特性状态在线检测、温度状态在线检测、真空度状态在线检测、SF₆ 气体特征量状态在线检测、电寿命状态在线检测、振动信号检测与分析几个方面。

(1) 机械特性状态在线检测 由于操动机构引起的高压电器设备故障比率最高,因此机械特性的状态检测成为各高校与研究机构关注的热点问题。许多高校和研究机构在这方面做了大量的工作。西安交通大学开发出基于双 CPU 的中压开关设备在线检测系统,可以在线检测中压开关设备分、合闸线圈电流,储能电机电流,动触头行程,平均分、合闸速度,刚分速度,三相不同期时间;并开发出用于开关设备的在线检测系统及专用集成电路。清华大学提出了以线圈电流、振动事件起始时间、位移、速度、加速度和振动信号能量为特征量的高压断路器机械状态的检测方法,对高压断路器行程特性、操动机构的碰撞过程、操作电磁铁动态特性进行了分析,并开发出了基于嵌入式系统的高压开关柜测控装置。华中科技大学研制了分布式结构的高压开关机械特性在线检测系统,以及基于虚拟仪器技术的断路器在线检测系统。北京交通大学开发了高压断路器机械状态在线检测的智能装置,可以长期在线检测断路器储能电机的电压和电流、分合闸线圈电压、三相断口开关量、行程信号、分合闸线圈电流等。

(2) 温度状态在线检测 温度状态检测是防止由温升故障造成断路器损坏的重要手段。目前,一些高校和研究机构在温度状态在线检测方面也做了大量的工作。西安交通大学开发出基于红外测温技术的高压断路器温度在线检测传感器及用于成套开关设备温度在线检测的接触式传感器。浙江大学研制出了高压开关触头和母线温度在线检测与监视系统。北京科技大学根据相对温差法开发出了断路器故障红外诊断的软件。

(3) 真空度状态在线检测 真空灭弧室的内部气体压力是确保真空灭弧室可靠运行的重要指标之一,对运行中真空灭弧室的内部气体压力进行实时检测是十分必要的。上海交通大学研制了一种新型的“两半组合式”磁场线圈,不用拆卸灭弧室,就可以使用磁控放电法测量灭弧室真空度;并提出了一种通过测量屏蔽罩的直流电位,即屏蔽罩上积聚的静电荷数量,来检测灭弧室真空度的方法。武汉大学提出了一种真空灭弧室内部气体压力在线检测的新方法:放电声发射检测法。大连理工大学采用耦合电容法,研制出了基于数字信号处理器(DSP)的真空断路器真空度在线检测装置。淄博供电公司根据电光变换法原理研制了真空断路器灭弧室真空度在线检测装置,并投入实际运行。

(4) SF₆ 气体特征量在线检测 六氟化硫(SF₆)气体是迄今为止最理想的绝缘和灭弧介质,广泛应用于高压断路器等高压电器设备中。在SF₆气体特征量(湿度、温度、压力、密度等)在线检测方面,许多高校、公司做了大量工作。重庆大学采用高分子电容式相对湿度传感器,结合温度测量和压力测量对SF₆气体中微水含量进行了在线检测。上海交通大学应用高分子电容式湿度传感器和压阻应变式压力传感器,研制了一种SF₆气体智能化微水、密度在线检测仪。江苏省电力公司南京供电公司开发出了数字式SF₆气体密度在线检测装置。西安交通大学对330kV罐式断路器中SF₆气体湿度的测量做了研究工作。

(5) 电寿命在线检测 目前,国内一些高校和研究机构针对各种断路器提出了表征其电寿命的判断依据,并开发了电寿命在线检测装置。中国电力科学研究院提出了表征真空断路器电寿命的若干判据:燃弧时间、首开相在三相中的分布状况、开断时间、开断电流。华中电力集团公司使用触头相对电磨损与相对电寿命方法,研制出断路器触头电寿命在线检测装置。华中科技大学提出了对高压断路器触头电寿命进行诊断的一种新方法:采用触头累积磨损量作为判断电寿命的依据。中国电力科学研究院通过对比国内外的试验方法和分析电寿命试验对断路器生产和用户的意义,提出了对我国国家标准和电力行业标准中E2级断路器试验方法的修改建议。

(6) 振动信号检测与分析 断路器操作振动信号分析是一种非侵入式的检测手段,它的优点是不涉及电气参量的测量,传感器安装于断路器的接地部分,对断路器的正常运行无任何影响。因此,近年来,针对振动信号检测与分析方面的研究也越来越多。西安交通大学将短时能量法应用于断路器操作振动信号分析,准确提取不同振动事件的起始时刻;并采用小波包频带能量分解方法对断路器进行状态识别和故障诊断。哈尔滨工业大学提出了基于小波奇异性检测的高压断路器故障诊断方法,以及基于径向基函数网络理论的高压断路器故障诊断方法。清华大学通过实验研究得出利用振动信号来区分不同振动事件的方法,并提出了使用振动信号相频特性描述振动波传播过程的方法。华中科技大学使用电流与振动双传感器对断路器实时检测,运用D-S证据理论和Dempster合成法则,对断路器故障进行了诊断。北京交通大学提出了基于分形理论的处理高压断路器机械振动信号的新方法。

1.2.2 低压电器设备状态检测研究现状

低压电器设备状态检测是低压电器研究与制造的很重要的一个方面,它对电器产品的特性研究、保证出厂产品的质量都有重要的意义。目前一些知名的开关电器制造厂商都有自己的检测方案和设备,国内外有很多高校和企业都在进行这方面的研究。

1. 触头电接触性能测试

随着计算机技术的发展,计算机在电接触现象的研究中得到了广泛的应用。1968年美

国 R. L. Dickhoff 和 P. W. Renault 首先设计出一种微机控制的触头寿命检测装置。1970 年日本 Kunio Mano 等设计出触头寿命的计算机全自动检测装置。该装置能自动测量接触电阻、电压、电弧能量等电参数,并能进行数据处理。但几种装置都存在共同的缺点:它们对触头的工作参数调节非常有限。

1980 年,法国的 A. Carballeira 和 J. Galand 设计出一种全新的触头动作微机模拟试验装置。它采用了频响很高的电磁激振器去取代继电器,这样不仅完全可以完成触头工作参数的调节,还可以完成力参数的测量。

1994 年,英国的 J. W. McBride 和 S. M. A. Sharkh 对不同分断速度、不同开断相位下,交流电阻性负载电路中,触头的电弧电压和电弧电流波形进行了观测,并且对触头材料的损耗进行了称重测量。J. W. McBride 指出,当触头分断速度从 0.1m/s 增加到 0.8m/s 时,电弧能量随之增加;而触头材料的转移与电流值、动触头极性、触头分断时刻和分断速度都有关系。试验时,触头的分断速度由电机转速决定,电弧电压和电弧电流的波形由示波器获得。

国内已研制成功的继电器试验微机检测系统有:

西安交通大学于 1989 年研制出基于 APPLEII 微机的直流单通道燃弧时间测量装置。

南昌电子研究所研制出的继电器寿命微机检测装置。

西安交通大学于 1994 年推出的多通道电弧能量及燃弧时间测量装置。

西安交通大学于 1995 年研制成功的继电器触头动作微机模拟试验及检测系统。

哈尔滨工业大学于 2001 年对不同分断速度下的极间电弧特性做了有益的研究。其方法为,使用自行设计的试验模型,在室温条件下,对直流情况的电阻性电路和电感性电路,利用示波器测量合金触头的电弧电压和电弧电流波形,并根据测得波形分析燃弧时间、电弧能量随触头分断速度变化的关系。结果指出,触头分断初速度越大,电弧燃弧时间越短,电弧能量减少越多。

西安交通大学于 2003 年研制成功一套适用于小容量控制电器的触头电接触性能测试装置。该装置可以测量电弧能量、燃弧时间、电弧长度、触头闭合压力、熔焊力、接触电阻等参数。

2. 接触器测试

1) 西昌师范专科学校于 2001 年提出了一种根据交流接触器力-位移静态特性曲线测量交流接触器触头机械参数的原理,并根据此原理设计了一种利用单片机系统实现自动测量交流接触器触头机械参数的系统。

2) 哈尔滨工程大学于 2002 年设计出一种铁路客车用断路器和接触器性能及可靠性测试系统。

3) 成都机床电器研究所于 2002 年研制出一套微机型接触器特征参数测试仪。该测试仪可以测试铁心总行程,主触头开距、超程,辅助触头开距、超程,主、辅助触头的同步性,接触器触头吸合、释放时间。

4) 福州大学于 2004 年设计出基于 DSP 与可视化技术的接触器动态测试装置,可实现对各个电压等级的接触器动作特性、触头开距、超程、吸持电流、励磁电压、三相主触头弹跳时间、三相同步差的测试。

3. 低压断路器保护特性测试

目前,一些有名的开关电器制造厂商都有自己的检测方案和设备,这保证了他们的产品

的质量、性能和与同行竞争的优势。国内由很多高校和企业都在进行这方面的研究,如西安交通大学、河北工业大学都获得了不同程度的研究成果。

总的来说,电器设备的状态检测,国内外都在关注。研制生产安全、可靠、智能化的电器设备状态检测系统适应了电力工业发展的需求,已成为电器行业发展的趋势。

1.3 电器设备状态检测领域中的关键技术

1. 传感器技术

传感器技术作为电器设备状态检测的关键技术之一,为后续处理和控制在提供信息来源,是保证电器设备状态检测系统正确运行的基础。随着现代计算机技术、通信技术与智能化电器的结合,促进了智能化电器向小型化、集成化、智能化和网络化的进步,同时也对传感技术提出了更高的要求。因此,大力发展智能化传感技术的研究已经成为电器设备状态检测技术进步的当务之急,新型传感技术的开发与应用是电器设备状态检测领域的重要挑战与机遇。目前广泛应用的电磁式互感器是按照过去的继电控制设备的应用条件而设计的,存在种种弊端。例如,由于线性范围的限制,需要使用两套电流互感器,一套用于测量,一套用于保护,造成资源浪费。随着传感技术的进步,各种新型传感器(如非接触式测温传感器,光纤电压、电流传感器,振动加速度传感器,阵列式磁传感器等)正在不断地应用到电器设备状态检测领域中。

2. 微处理器技术

微处理器是电器设备状态检测系统的核心,它的性能优劣直接决定了产品性能的好坏;反过来讲,产品性能要求的不断提高也对选用什么样的微处理器提出了挑战。十几年来,电器设备状态检测系统在微处理器的选用上发生了很大的变化。从最初的单一8位微处理器(MCU)结构的智能装置问世,很快发展为16位单片机为主流的产品,近几年在高端产品中又发展为以32位单片机和工业控制计算机及以DSP技术和多MCU为主导的事实标准。之所以其硬件的发展如此之快,一方面由于电器设备状态检测领域新理论的不断出现对测控器硬件的速度和性能提出了越来越高的要求,另一方面得益于近几年集成电路技术的不断发展,其性能越来越高,价格越来越便宜。

技术的进步加速了电器智能化产品的更新换代,在市场竞争越来越激烈的环境下,寻求一种新的产品开发方式,进一步加快新产品的开发速度、降低开发成本、提高产品的性价比将具有更重要的意义。

3. 总线技术

采用总线技术,可以使安装在被测电力设备上的智能化电子设备与计算机之间实现双向的数字通信,从而组成开放的、数字的、多点的底层测控网络。对于电器设备状态检测系统,有多种总线技术可以选择,目前以485、CAN、Lonworks应用最为广泛。

4. 专用集成电路技术

目前的电器设备状态检测系统硬件基本上是以MCU或DSP为核心,因此,微处理器性能的好坏直接影响系统的功能。由于微处理器的一些固有不足,如效率低、升级困难、程序指针易受干扰、开发周期长等,影响了其在电器智能化领域的进一步应用。20世纪90年代迅速兴起的可编程ASIC技术可以从根本上解决微处理器所面临的问题。利用ASIC器件,

既保证了灵活性,又兼顾了 ASIC 的价格低和并行处理的快速性。采用专用集成电路可降低产品成本、提高产品可靠性、减少体积,还可以以硬代软,提高处理速度;软件可固化于专用芯片内部,使其标准化、模块化。因此,专用集成电路技术是当前研究与应用的热点。

5. 数字信号处理技术

近年来,随着数字处理技术的发展,各种数字信号处理方法不断地应用于电器设备状态检测领域,特别是电器设备的状态识别和故障诊断中。通过使用各种非平稳信号分析方法(如联合时频分析方法、ARMA 模型参数估计法、神经网络、小波变换、分形几何等)对电器设备振动信号进行处理和分析,从而对设备进行状态识别和故障诊断已经成为近年来研究的热点问题。同时,数字信号处理器(DSP)的出现,也使各种复杂数字信号处理方法的硬件实现成为可能。

6. 虚拟样机技术

虚拟样机技术是指在产品的设计开发阶段,将分散的零部件设计和分析技术(指在某单一系统中零部件的 CAD 和 FEA 技术)揉合在一起,在计算机上建造出产品的整体模型,并针对该产品在投入使用后的各种工作情况进行仿真分析,预测产品的整体性能,进而改进产品设计,提高产品性能的一种新技术。虚拟样机技术集信息技术、仿真技术、计算机技术于一体,是对传统设计方法的一次历史性的革命。以其为基础的现代设计方法,改变了以物理样机为基础的传统设计方法,大大减少昂贵而费时的物理样机制造及试验过程,使用户可以直接在计算机上建立样机模型,对模型进行各种动态性能分析,快速分析、比较多种设计方案,然后改进样机设计方案,进行优化设计。在设计早期就及时发现潜在的问题,这是提高产品质量、缩短产品开发周期、降低产品开发成本最有效的途径。由于开关电器设备操动机构的分合闸运动过程实质上就是机构的动力学运动过程,所以在开关电器设备机构动态特性的研究中使用虚拟样机技术能更加直观地分析样机模型的动作情况,以及各个参数对动态特性的影响情况。这有利于新产品的研发、优化设计及故障模拟实验,进而缩短研发周期,降低研发成本,并且为产品安全运行做准备。

参 考 文 献

- [1] 周鹤良. 我国电力工业发展机遇和应用电力电子技术的思考[C]. 第八届全国“智能化电器及应用”学术年会论文集. 深圳: 中国电工技术学会电器智能化系统及应用专委会, 2005: 1-4.
- [2] 李建基. 高压开关发展评述[J]. 电气时代, 2005(11): 26-30.
- [3] 曹荣江, 顾宽鸿. 高压交流断路器的运行条件[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1999.
- [4] 钱家骊, 黄瑜珑, 徐国政. 智能化高压开关设备的开发应用[J]. 高压开关行业通讯, 1997(12): 33-36.
- [5] Kayano P S D, Silva M S, Magrini L C, et al. Distribution substation transformer and circuit breaker diagnoses with the assistance of real-time monitoring[C]. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. Latin America, 2004: 185-189.
- [6] 要焕年. 电气设备两种维修制度的比较[J]. 电网技术, 1997(5): 55-61.
- [7] 黄瑜珑, 钱家骊. 高压断路器机械状态的监测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(4): 79-81.
- [8] Meng Y P, Jia S L, Rong M Z. Mechanical condition monitoring of vacuum circuit breakers using artificial neural network [J]. IEICE Trans. on Electronics, Vol. E88-C, 2005(8): 1652-1658.
- [9] Frontzek F R, Konig D. Methods for internal pressure diagnostic of vacuum circuit breakers[C]. Proceedings of IEEE 18th Int. Sympo. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Eindhoven, German, 1998: 467-