

常用 电气设备故障诊断 技术手册

汪永华 陈化钢 等 编著



CHANGYONG
DIANQISHEBEI
GUZHANGZHENDUAN
JISHUSHOUCE



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

常用 电气设备故障诊断 技术手册

汪永华 陈化钢 何 强 马光胜 编著
蒋瑾瑾 王礼鹏 张发挥



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本手册全面、系统地介绍了常用电气设备的故障诊断和维修技术及技能,全书共分15章,内容包括:常用电气设备故障诊断概论、电气设备绝缘预防性试验、电力变压器故障诊断、高压开关设备故障诊断、互感器故障诊断、套管与绝缘子故障诊断、电力电容器故障诊断、防雷与接地装置故障诊断、电力线路故障诊断、低压控制设备故障诊断、电动机故障诊断、常用传感器与检测技术故障诊断、可编程序控制器(PLC)故障诊断、变频器故障诊断、电气二次回路故障诊断。

本手册为广大电气工程技术人员及管理人员正确、合理地掌握常用电气设备故障诊断与处理方法而编写,集先进性、实用性、全面性于一体,可供从事电气设备故障诊断与检修的工人或者工程技术人员使用,也可作为大中专院校电气相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

常用电气设备故障诊断技术手册/汪永华等编著. —北京:中国电力出版社, 2014. 9

ISBN 978 - 7 - 5123 - 5769 - 3

I. ①常… II. ①汪… III. ①电气设备—故障诊断—技术手册 IV. ①TM07-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 075428 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年9月第一版 2014年9月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 46.5印张 1273千字

印数 0001—3000册 定价 99.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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



前 言

随着我国电力事业的蓬勃发展,电力已广泛应用在生产和生活的各个领域。目前,在广大城乡,各行各业都形成了庞大的电工队伍,而不少新上岗的人员在电气设备故障诊断与试验中,往往对常见的问题缺乏分析和处理能力,以致发现不了电气设备故障的原因或造成误判断、错处理,使原本可以避免的事故没能有效防止,甚至使事故进一步扩大,造成不应有的损失。此外,即使有一定工作经验的人员,也难以全面掌握各种电气设备的常见故障诊断与检修技术。为了快速提高现代电工从事电气设备故障诊断与检修的技能,特别是初级维修电工的技能水平,保证电气设备的安全可靠运行,特编写本手册。

本手册编写时力求体现以下特色:先进性,本手册所引用的技术标准,采用了最新的国际标准及部颁标准,编写中以现场应用或正在推广的新设备、新技术、新工艺作为分析对象,反映最新的技术成果;实用性,本手册易学、易用、易操作,做到理论联系实际,强化工程意识,促进广大电工在电气设备故障诊断与维修技能的提高,通过本书的学习,能快速了解电气设备的常见故障现象和故障原因,并能掌握电气设备的常见故障处理方法,为从事电气与电控设备故障诊断与维修工作打下良好基础;全面性,本手册内容包括常用电气一次设备、电气二次部分等,能满足农村、城市、工厂、企业等广大电气工作者的需要。

本手册内容丰富、简明实用、浅显易懂。读者通过对本书的学习,能快速掌握高、低压电气设备故障诊断与检修的技术,大大提高自己从事电气设备故障诊断与维修的业务水平和工作能力。

本手册由汪永华担任主要编写人,参加本手册编写的人员还有陈化钢、何强、马光胜、宁飞、曹文霞、潘正丰、王正风、蒋瑾瑾、王礼鹏、张发挥、江淑军、汪凤凤、何伟、李媛媛等。全书由汪永华负责统稿。

本手册在编写过程中,查阅了大量的资料,参考和引用了有关书籍的部分内容,谨向这些作者表示衷心的感谢。由于电气设备故障诊断与检修涉及面广,新产品、新技术的应用发展较快,加之编者水平有限,不妥和错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者



目 录

前 言

第一章 常用电气与电控设备故障诊断概论	1
第一节 故障诊断的产生与发展	1
第二节 电气设备故障诊断的意义与方法	3
第三节 电气设备故障诊断	5
第二章 电气设备的绝缘预防性试验	9
第一节 电气绝缘基础理论	13
第二节 测量绝缘电阻、吸收比及极化指数	34
第三节 测量泄漏电流	52
第四节 测量介质损耗因数 $\tan\delta$	74
第五节 交流耐压试验	100
第六节 直流耐压试验	119
第七节 测量局部放电	122
第八节 绝缘油的性能试验	137
第九节 油中溶解气体色谱分析	150
第十节 红外测温	175
第十一节 电气绝缘在线监测	185
第三章 电力变压器故障诊断	187
第一节 变压器的故障	187
第二节 变压器的巡视检查	188
第三节 变压器的异常运行分析及事故处理	192
第四节 变压器的检修	204
第五节 变压器的干燥与油处理	229
第六节 干式变压器常见问题及处理方法	240
第七节 变压器的状态监测与故障诊断	249
第八节 变压器的试验	261
第四章 高压开关设备故障诊断	273
第一节 高压断路器异常运行分析与事故处理	273
第二节 真空断路器的常见故障及处理	285
第三节 SF ₆ 断路器的常见故障及处理	291
第四节 断路器操动机构故障诊断	297
第五节 高压断路器状态监测与故障诊断	305
第六节 高压隔离开关故障诊断	309
第七节 高压负荷开关与高压熔断器故障诊断	313
第八节 高压成套装置（高压开关柜、GIS、箱变等）故障诊断	318
第九节 高压开关电器试验	323

第五章 互感器故障诊断	347
第一节 概述	347
第二节 互感器的运行	349
第三节 互感器的检修	352
第四节 互感器的状态监测与故障诊断	354
第五节 互感器的试验	357
第六章 套管与绝缘子故障诊断	373
第一节 套管与绝缘子异常运行分析与事故处理	373
第二节 套管与绝缘子状态监测与故障诊断	375
第三节 套管与绝缘子的试验	379
第七章 电力电容器故障诊断	388
第一节 电力电容器异常现象及故障分析	388
第二节 电力电容器状态监测与故障诊断	398
第三节 电容型试品的在线监测	415
第八章 防雷与接地装置故障诊断	418
第一节 避雷器异常运行分析与事故处理	418
第二节 避雷器状态监测与故障诊断	425
第三节 避雷器的试验	429
第四节 接地装置状态监测与故障诊断	431
第五节 接地装置的安装	432
第六节 接地装置试验	439
第九章 电力线路故障诊断	448
第一节 架空线路异常运行分析与事故处理	448
第二节 电缆线路异常运行分析与事故处理	460
第三节 电力线路状态监测与故障诊断	482
第四节 电力线路的试验	492
第十章 低压控制设备故障诊断	506
第一节 刀开关故障诊断	506
第二节 低压空气断路器故障诊断	507
第三节 交流接触器故障诊断	513
第四节 剩余电流保护装置故障诊断	516
第五节 其他低压电器故障诊断	534
第六节 低压电器试验	540
第十一章 电机故障诊断	542
第一节 电动机的故障类型及使用	542
第二节 电机的故障与诊断	544
第三节 电动机的故障及检修	548
第四节 电机的状态监测	569
第五节 电机的试验	580
第十二章 常用传感器与检测技术故障诊断	597
第一节 传感器知识概述	597
第二节 温度传感器故障诊断	605
第三节 力敏传感器故障诊断	617
第四节 传感器的选用	625
第五节 变送器故障诊断	630

第六节 常见传感器的故障分析	633
第十三章 可编程序控制器 (PLC) 故障诊断	645
第一节 PLC 结构与工作原理	645
第二节 PLC 正常运行的条件及安装注意事项	651
第三节 PLC 常见故障分类以及诊断	654
第四节 PLC 常见干扰及防干扰措施	659
第五节 PLC 编程软件与软件故障诊断	661
第六节 PLC 日常检修与维护	668
第十四章 变频器故障诊断	670
第一节 概述	670
第二节 变频器过电压故障保护	674
第三节 变频器过电流故障	679
第四节 变频器过载故障	682
第五节 变频器电路故障	685
第六节 常用变频器故障代码表	703
第十五章 电气二次回路故障诊断	711
第一节 电气二次回路异常运行分析与处理	711
第二节 电气二次回路故障诊断	718
第三节 电气二次回路状态监测与故障录波装置	727
第四节 电气二次回路试验	732
参考文献	736

第一章 常用电气与电控设备故障诊断概论

第一节 故障诊断的产生与发展

一、故障诊断的产生

“诊断”一词原是医学名词，它的含义是“在检查病人的症状之后判定病人的病症及其发展情况”。从智能理论的现实来看，诊断是医生收集病人的症状（包括医生的感观、病人的主观陈述以及各种化验检测所得到的结果），并根据症状进行分析处理，以判断病人的病因、严重程度，从而确定对病人的治疗方案和措施。

“人体健康”与“设备健康”从仿生学概念来理解是相同的。电气设备的故障诊断就是借用这种概念把医学诊断的基本思想推广到工程中，从而形成了设备的故障诊断技术。从广义而言，它是通过对电气设备绝缘的试验和各种特性的测量，了解与评价电气设备在运行中的状态，从而能早期发现故障的技术。其中“试验与测量”是“诊”，而“识别与评估”是“断”。通常，设备故障诊断由状态监测、故障诊断、状态预测、安全保障和维修决策等主要环节组成，如图 1-1 所示。

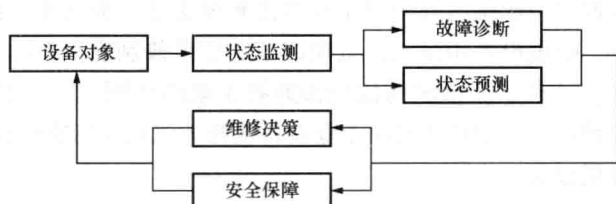


图 1-1 设备故障诊断主要环节

从狭义而言，“诊断”是指故障诊断，指特征量收集后的分析判断过程，即专家根据状态监测所得到的各种测量值及其运算结果所提供的信息，采用所掌握的关于设备的知识和经验，进行推理判断，找出设备的故障类型、部位及严重程度，从而提出对设备的维修处理建议。而特征量的收集过程称为“检测”或“监测”（连续或随时进行的检测），所以两者是紧密相连的，是一个有机整体，通常又称为“状态监测与故障诊断”。状态监测是故障诊断的基础、先决条件及必要手段，它相当于医生“号脉”的手指、诊断听诊器、放射检查的 X 光机、观察内部器官的 B 超、CT 等。而故障诊断则综合利用监测数据和信息进行决策的部分，好的故障诊断系统就像有经验的医生。

状态监测与故障诊断技术产生的背景如下。

(1) 减少和防止突发性事故。电气设备，特别是大型高压设备，发生突发性停电事故，会造成巨大的经济损失和不良的社会影响。因此对电气设备进行必要的检查和维修就成了电力运行部门的重要工作内容。

(2) 改革检修制度。通常电力部门采用定期试验和维修方式，即预防性维修，现在，定期预防性试验和维修已在电力部门形成制度，对减少和防止事故的发生起到了很好的作用，但预防性试验是离线进行的，有如下很多不足之处。

1) 设备离线状态与运行中不符。设备离线状态(如作用电压、温度等)与运行中不符,无法真实反映运行电压下的绝缘性能和整个设备工况,影响判断准确度,所以最终检测结果的可信度大大降低,这就是整体预防性试验合格,但仍时有发生故障发生的原因。据不完全统计,全国1985~1990年间80%的变压器事故是在预防性试验结果合格的情况下发生的。

2) 具有盲目性和强制性。由于定期维修是到期必修,既不考虑电气设备制造质量的差异,也不考虑电气设备的实际的运行条件和运行状态,实行“一刀切”,这就具有很大的盲目性和强制性,因而会造成电气设备的“过度维修”或“维修不足”前者会浪费大量的人力、物力和财力,后者可能导致电气设备在两次维修周期内发生故障。例如,某电厂主压器220kV侧A相避雷器,维修后,在投运时间不到1个月就因密封不良和受潮导致爆炸。

3) 导致新的隐患。在“过度维修”过程中,由于维修者技术不佳、工艺不良或管理不善,在频繁的拆装过程中就容易造成新的隐患。例如,某50MVA的电力变压器,维修后,110kV侧分接头2的直流电阻超标,反复查找找不出原因,最后把分接头2的静触头紧固螺丝紧了半圈后,直流电阻合格;又如某30kVA的三相油浸式配电变压器,大修后就检查出有短路故障。东北某农电局曾多次检出大修后电力变压器的绝缘缺陷。

4) 耐压试验可能对绝缘造成损伤。由于在维修后要对电气设备绝缘进行耐压试验,而施加的试验电压又远高于其额定电压,所以就可能在试验过程中对绝缘造成不可逆的损伤,它不仅可能缩短绝缘寿命,而且可能引发事故。有的电气设备在维修后,投入运行时间不长就发生绝缘事故,可能与耐压试验造成的绝缘损伤有关。

基于上述,状态维修已引起国内外电力工作者的普遍关注。近几年,我国也开始研究状态维修,部分单位在发电、供电设备中试点,以期改革定期维修制度。新的维修制度要求有一个相应的新技术与之配套,这样状态监测与故障诊断技术就应运而生了。目前,在DL/T 838—2003《发电企业设备检修导则》中已将发电企业设备检修的强制性标准修订为推荐性标准。

二、故障诊断的发展过程

1. 国外

国外设备故障诊断技术的研究已有近50年的历史,其发展历经了三个阶段。

(1) 初级阶段。在这个阶段中由于设备比较简单,故障诊断主要依靠专家或维修人员的感觉器官、个人经验及简单仪表就能进行故障的诊断与排除工作。

(2) 引入测试新技术阶段。由于传感器技术、动态测试技术及信号分析技术的发展,诊断引入了这些新技术,使诊断技术发生质的变化,并且在维修工程和可靠性工程中得到了广泛的应用。

(3) 智能化阶段。20世纪80年代以来,由于设备日趋复杂化、智能化及光机电一体化,传统的诊断技术已不适应了。随着计算机技术、人工智能技术特别是专家系统的发展,使诊断技术进入智能化阶段。目前,对复杂系统的智能诊断已成为智能技术研究的前沿课题和热点。有的国家已研制出一些智能诊断系统,如火箭发动机故障诊断专家系统、卫星控制系统地面实时故障诊断专家系统等。

2. 国内

我国设备诊断技术起步于20世纪80年代初期,从发展看,大体有三个历史阶段。

(1) 起步阶段。这个阶段从1979~1990年,大约历经了10年时间,其特点是:认识设备诊断技术的重要性,开始研究和尝试应用诊断技术,设备诊断技术的基础理论研究十分活跃,其中以快速傅里叶变换、谱分析、信号处理等技术为基础,以设备状态监测为技术目标。

(2) 发展阶段。这个阶段从1991年开始,以我国工业建设迅速发展为背景,以现代化管理的需要为前提,出现了诊断技术迅速发展的局面。在管理制度与维修体制改革的推动下,设备

监测诊断技术已成为企业管理完善与否,企业管理水平高低的衡量标尺之一。同时,就诊断技术本身而言,无论在诊断方法上,诊断手段(仪器与系统)上,诊断效果上都有很大进步,在这个阶段中,以故障分类、模式识别、智能化专家系统及其计算(故障树计算、模糊逻辑计算、神经网络计算、基因计算等)等为基础,以设备故障诊断为技术目标。

(3) 高级阶段。从21世纪初开始,将进入设备诊断技术进一步完善的阶段,在诊断理论、诊断设备的性能、诊断技术的应用推广上,都将达到一个新的水平,这个阶段以优化控制、经济运行、寿命管理、系统工程等为内容,以设备全过程经济管理为技术目标,不仅要求有新的监测及诊断技术和方法,同时要与计算机化的设备维修管理相结合。诊断技术与维修和设备管理真正结合是这个阶段的重要标志,它将使设备维修逐步进入状态检修阶段,带来巨大的经济效益,达到世界先进技术国家的水平。由上述,可以认为我国绝缘故障诊断技术的研究和国际上是同步发展的,处于几乎相同的水平。

目前,我国的监测与诊断技术,尚待研究、完善的问题如下。

- 1) 传感器技术的研究。
- 2) 信号分析与信号处理技术的研究。
- 3) 智能理论的研究。
- 4) 监测与诊断系统的开发与研究。
- 5) 由单一的、相互孤立的监测与诊断系统转向综合自动化网络系统发展的研究。
- 6) 设备故障机理等的基础研究。
- 7) 经济效益的研究。

► 第二节 电气设备故障诊断的意义与方法

一、故障诊断的意义

电气设备由绝缘材料、导电、导磁材料及结构材料组成。在运行中,绝缘材料由于受到电、热、机械、化学、环境等因素的作用容易逐渐劣化,造成设备故障,引起供电中断。据报道,对110kV及以上的电力变压器的98次事故原因分析,其中匝间绝缘、引线及对地绝缘、套管绝缘所引起的各种事故约分别占43%、23%、15%,而铁心、分接开关等非绝缘事故仅占20%以下。可见对绝缘故障进行正确诊断与及时处理,对提高电气设备运行可靠性,避免断电事故具有重要意义,主要表现如下。

(1) 减少设备事故率。研究表明,有效地进行设备监测和故障诊断,一般可减少设备事故率75%,降低设备维护费25%~50%,英国的学者统计认为,开展旋转机械的振动量监测,其获利与投资之比高达17:1。

(2) 提高经济效益。采用监测与诊断系统可避免设备事故,从而带来可观的经济效益。美国Pekrul电厂装机容量为1000MW,电价按0.015美元/度计算,年产值1亿美元,据可靠性分析,整个系统每年可能有14次事故停机,采用监测与诊断技术后,有50%的事故能够被检测出来,若一次停机消缺检修平均需要三天,损失将超过100万美元,一套监测系统投资为30万美元,减少1天的事故停机时间,投资费用就可以回收。

(3) 奠定状态检修的基础。绝缘的劣化、缺陷的发展虽然具有统计性,发展的速度也有快慢,但大多具有一定的发展期。在这期间,会有各种前期征兆,表现为其电气、物理、化学等特性有少量渐进的变化。随着电子、计算机、光电、信号处理和各种传感技术的发展,可以对电气设备进行在线状态监测,及时取得各种即使是很微弱的信息。对这些信息进行处理和综合

分析后，根据其数值的大小及变化趋势，可对绝缘的可靠性随时作出判断并对绝缘的剩余寿命作出预测，从而能早期发现潜伏的故障，必要时可提供预警或规定的操作。状态监测（在线监测）与故障诊断技术的特点是可以对电气设备在运行状态下进行连续或随时监测与判断，为状态检修奠定基础。电气设备诊断过程流程示意图如图 1-2 所示。

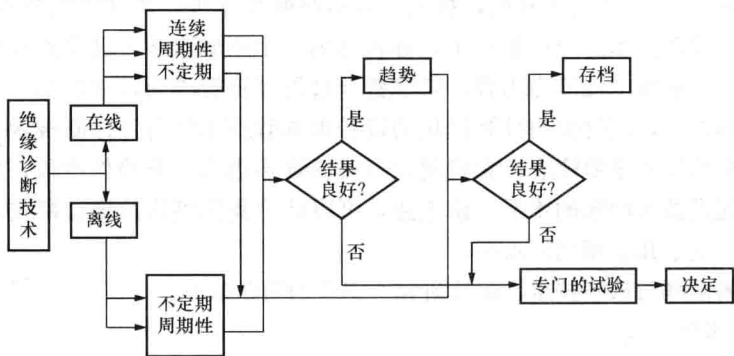


图 1-2 电气设备诊断过程流程示意图

采用状态维修后，通常都能使大修时间间隔延长，与定期维修相比，其相应的维修次数也就减少了。美国一家公司认为采用状态维修后，主要设备的大修周期由 3 年延长到 7~8 年（实行状态维修后实际上不存在维修周期的概念，应为两次维修的时间间隔）。

二、故障诊断的方法

监测与故障诊断技术有三要素：信息采集、数据处理与分析、处理意见与决策。简要说明如下。

1. 信息采集

信息采集的手段主要有：

(1) 离线测试。离线测试通常指的是传统的预防性试验。它是为及时发现电气设备潜在的缺陷或隐患按规程规定的周期定期进行的试验。主要有测量绝缘电阻、测量泄漏电流、测量介质损耗因数、测量直流电阻、交流耐压试验、直流耐压试验以及绝缘油试验、油中溶解气体色谱分析等。

(2) 在线监测。在线监测是在不影响设备运行的条件下，对设备状态连续或定时进行的监测，通常是自动进行的。它是收集特征量的重要手段和途径。其关键是究竟要对哪些量进行监测才能得到有用的信息，诚然，设备不同、结构各异，反映其状态的特征量不完全相同，电气设备绝缘在线监测项目见表 1-1。目前我国在发电机、变压器、电容型产品、电缆、避雷器、高压断路器、GIS 等电气设备上都不同程度地采用了在线监测技术、安装了在线监测装置，积累了一些好的经验，这不仅对进一步推广在线监测技术具有重要意义，而且能有力地促进电气设备由定期维修向状态维修过渡的过程。然而，要灵敏、有效地反映绝缘状态还需要重点研究信息传递手段、绝缘劣化的机理和规律、干扰的抵制、绝缘状态的判断等，使在线监测技术不断完善，为状态维修提供可靠的特征量。

表 1-1 电气设备绝缘在线监测项目

设备名称	监 测 项 目
发电机	局部放电、过热、振动
电力变压器	色谱分析、局部放电、温升、电容电流、介质损耗因数

续表

设备名称	监 测 项 目
电容型设备	介质损耗因数、电容量、泄漏电流
MOA	全泄漏电流、阻性电流
GIS	局部放电
断路器	泄漏电流
电容器	介质损耗因数、电容量、泄漏电流
电力电缆	泄漏电流
瓷绝缘子	污秽泄漏电流

应当指出,在线监测虽然具有及时、灵敏等特点,但是目前还无法完全取代传统的预防性试验的作用。原因是:①有一些预防性试验项目如直流试验、超低频试验、脉冲波试验等是在线监测所无法做到的;②在线监测数据在传输过程中受到传感设备、传输环境等因素的影响,常常会存在比较多的干扰,甚至造成测量数据有较大的误差;③在线监测目前还缺少系统的测量数据和经验,相应的国家标准也还没有制定,关于在线监测和预防性试验数据的对应性存在很多争议。与此相反,预防性试验在我国已经实施多年,已经积累了丰富的现场经验。

可见,在线试验和离线试验不是对立的,而是相辅相成的。如在线监测中发现事故隐患后,必要时在离线状态下进行更为彻底的全面检查。综合在线测量数据和预防性试验的结果,取长补短,才能取得更加理想的诊断结果。

(3) 建立电气设备状态数据库。数据可以提供大量的状态信息,其主要内容应包括出厂试验、交接试验、预防性试验中历次试验报告、各种状态参数、维修记录、故障记录、运行记录和异常现象等,它能为状态分析提供有益的依据,为统计分析奠定基础。

2. 数据处理与分析及处理意见与决策

这两个因素较薄弱,需要加强开发各种可供分析判断的软件,用以进行电气设备故障诊断。关于这个问题将第三节中叙述。

► 第三节 电气设备故障诊断

一、电气设备状态监测与故障诊断系统

1. 监测与诊断系统分类

电气设备是电力系统中非常重要的设备,其运行状态直接影响系统的安全性。故障诊断技术是保证电气设备安全运行的基本措施之一。两者构成的监测与诊断系统的类型如下。

(1) 简易式。功能简单,如模拟量监测装置,机械化或荧光屏显示。又如便携式数据采集器,由数码管显示或将采得数据带回,输入计量机处理。

(2) 以单片机为核心的监测装置。以单片机为核心,结合传感器、多路开关、模/数转换器,微型打印机和固化在可编程序存储器中的软件,可组成最简单的连续监测系统。

(3) 以计算机为核心的监测系统。采用单台计算机代替单片机,可以提高系统的数据处理能力,增加分析诊断功能,可发展为分级管理的分布式监测诊断系统。

2. 基本单元

监测与诊断系统的组成框图如图 1-3 所示,它包括的基本单元如下。

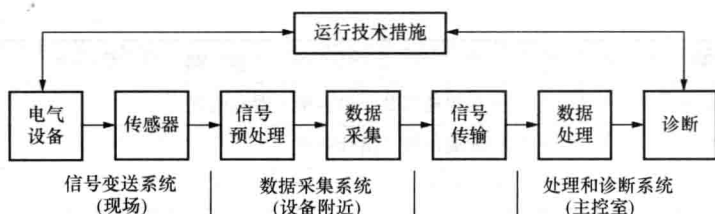


图 1-3 监测与诊断系统组成框图

(1) 信息的检出及适配单元。由相应的传感器从待测设备上检出反映设备状态物理量（特征量）并将其转换为合适的电信号，向后续单元传送。

(2) 数据采集及前置单元。将传感器变送来的信号进行预处理，主要是对混杂在信号中的干扰进行抵制，以提高信噪比。并对经过预处理的信号进行 A/D 转换及采集记录。

(3) 信息的传输单元。将采集到的信息传送到后续单元。对于固定式监测系统因数据处理单元远离现场，故需配置专门的信息传输单元；对便携式检测装置，只需对信号进行适当的变换和隔离。

(4) 数据处理单元。对所采集到的数据进行处理和分析，例如读取特征值，作时域频域分析/平均处理等，为诊断提供有效的数据。

(5) 诊断单元。对处理后数据、判据、规程以及运行经验等进行分析比较，对设备的状态及故障部位作出判断，为采取进一步措施（如需否退出运行、安排维修计划等）提供依据，必要时提供预警。

由于特征量和状态不是一一对应，因此需作综合性的分析与判断，专家的经验会发挥重要作用。人工智能的重要分支——专家系统在诊断技术中的应用已得到重视。

二、电气设备故障诊断存在的问题

近些年来，我国有大量的监测设备和监测系统相继投入现场。但从目前的应用情况来看，这些监测设备和监测系统的应用还存在一些问题，主要表现为如下。

(1) 监测系统存在质量问题。目前，开发和生产状态监测系统的单位很多，投放市场的产品也很多，许多产品没有经过严格的检验和考核。近几年的运行情况已经暴露出产品质量问题。有的监测系统一投入运行工作就不正常，所以保证产品质量应引起充分重视。

(2) 状态监测分析系统本身运行可靠性欠佳。主要表现在：装置本身质量问题。如元件性能不稳定，失效或破损；装置的抗干扰性能较差，抗外界因素如温度、湿度变化的能力差；装置整体运行可靠性差，测量数据不稳定，起不到监测设备绝缘状况的作用等。状态监测分析的准确性问题。其准确性不能令人十分满意。

(3) 运行操作人员素质急待提高。如系统电源掉电或插头松脱，运行人员未能及时恢复，系统得不到应有的维护，使得本来很容易解决的问题复杂化。所以要提高运行操作人员业务素质。

(4) 在线监测系统的功能需进一步完善和提高。经过几年的运行，已经暴露出一些监测系统的设计问题，需要结合在线监测的特点从技术角度综合考虑进一步提高产品的稳定性和准确性，保证传感器自身质量及现场测量中的可靠性，才能得到更好的效果。

(5) 监测设备多分散、孤立。目前投入使用的电气设备监测设备多为分散孤立的设备，大多是通过检测某一个或某几个参数，对照规程或是现场经验给出超标或不超标的判别结论。然而，由于电气设备的结构比较复杂，事故种类较多，对于许多故障的发展过程和相关特征参量

的变化规律尚未研究透彻,因此很难由单独的一个或几个参数分析出设备的具体故障,必须综合考虑设备的各类状态参数才能对设备状态作出正确的评估。

(6) 分散系统的监测结果缺乏统一。多个孤立监测设备或系统间缺乏相互通信、共享数据的手段,因此有必要提出一个统一的系统,将各个分散系统的监测结果统一组织起来进行分析。

三、智能理论在电气设备故障诊断中的应用

目前智能理论在电气设备故障诊断中已获得较广泛的应用,下面以电力变压器为例进行介绍。

1. 专家系统的应用

专家系统是一种带有智能功能的计算机程序。通常由五部分组成:知识库、推理机、综合数据库、解释接口或人机界面和知识获取。各个部分之间的相互关系一般可表达为如图 1-4 所示。

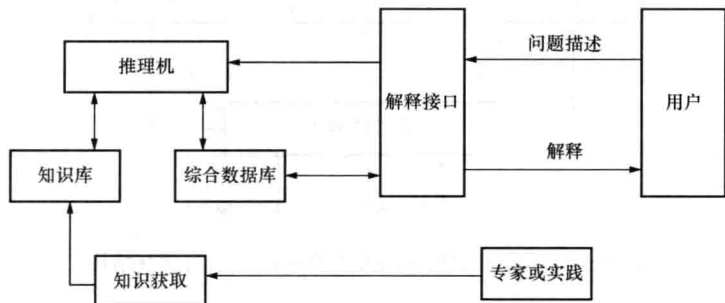


图 1-4 专家系统

目前专家系统已在电气设备故障诊断领域获得了广泛的应用,其原因:一是设备故障诊断是一种技术复杂和需要多方面领域知识的工作,诊断中需要许多独特的专家经验和各方面的信息,才能胜任此项工作和高效地解决问题。二是由于设备数量、自动化程度和复杂程度不断提高,专家系统有助于提高故障设备诊断和维修效率,能向设备维修人员提供故障诊断的技术咨询和辅助指导。在电气设备故障诊断中,专家系统也有许多方面的应用。

2. 神经网络的应用

神经网络是一种全新的模拟人类智能的方法和技术。它和专家系统的机理不同,不需要从领域专家那里提取显式知识形成知识库,而只需根据领域问题组织训练样本,通过自组织、自学习就可以获得独立的领域知识。在众多的 ANN 模型中 BP 模型具有结构简单、收敛速度快、易处理分类等特点,因此,在模式识别、故障诊断中获得了广泛的应用。神经网络能有效地解决诸如模式识别、曲线拟合、函数近似、群体分类、优化计算和联想记忆等一系列问题。它在电气设备故障诊断中同样获得了广泛的应用,取得了一些成果。

3. 专家系统和神经网络相结合

故障诊断专家系统的特点是在故障征兆与原因间建立明确的对应关系,当故障现象与专家系统知识库中的规则相对应时,会取得很好的诊断效果。但由于知识多样并且随着设备结构的改变,知识还需要不断更新,因此,仅靠设计者预先输入的知识进行诊断是不够的,应该使专家系统能在实践中不断地获取知识。但由于传统设计方法中存在知识获取的“瓶颈”问题,故障现象和故障原因间存在着大量的非一一对应关系,以及专家知识规则化等问题难以完全解决,造成专家系统的知识库的不完备,以致当遇到一个没有相应规则与之对应的新故障时,系统就无法诊断了。解决这一问题的途径是通过学习新的知识,使知识库不断完善。学习是通过人机

交流从专家那里获取知识,并存储在知识库中。因此,这种知识的获取是被动进行的。而以非线性并行分布处理为主流的神经网络理论为智能诊断的研究开辟了新的途径。人工神经网络技术目前已经成功地应用于故障诊断领域,它和专家系统不同的是神经网络通过对训练学习样本的迭代学习,所得到的知识以分布隐式方式存储在整个网络结构中。人工神经网络应用于变压器故障诊断时,通常是每个输出神经元对应于一个故障原因。因此,当新的故障现象(即新的输入)出现时,如果有些故障与训练学习样本相差过大,就可能没有相应的输出单元与之对应,故障诊断系统就会出现错误。产生这一缺陷的原因在于神经网络的训练样本不够完备。解决这一问题的方法是使神经网络动态化,也就是当新的输入与原来的训练学习样本相差较大时,可使它成为新的训练学习样本,并和原来的样本一起参与对网络结构的修正,形成新的神经网络结构。基于神经网络的专家系统的一般功能与结构如图 1-5 所示。

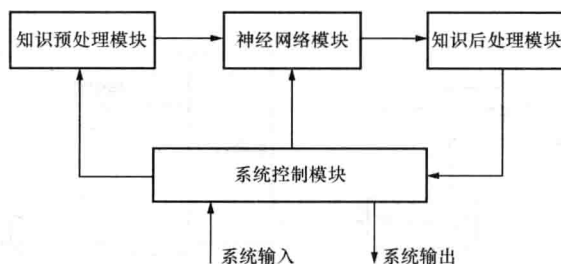


图 1-5 基于神经网络的专家系统的一般功能与结构

4. 模糊理论的应用

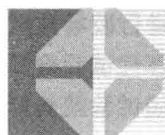
由于在电力设备故障诊断过程中会遇到信息(包括数据和知识)不完备、不明确的情况,因此如何利用这些信息进行推理和决策成为一个十分重要的难题。由于模糊数学理论能够用模糊集合来反映事物的模糊性,因此,近年来许多专家学者将模糊数学引入电气设备故障诊断中,将模糊性信息定量表示,有效地解决了专家系统的知识获取、表达及推理和神经网络中的输入形成等一系列模糊问题。

(1) 模糊数学同专家系统相结合。在电气设备故障诊断中,模糊数学与专家系统结合使用。模糊常用于三个方面:知识获取过程中的模糊、获取的模糊知识的表示以及模糊推理。

(2) 模糊数学同神经网络相结合。ANN 的最大优点之一是具有自组织学习能力,通过对于训练学习样本的不断补充与学习,获得新的知识,对新出现的故障形式进行诊断。变压器故障诊断的目的就是依据故障的现象,确定故障的性质或部位。将模糊同 ANN 结合起来对变压器进行故障诊断,就是将已知的故障现象及结论作为学习样本,其中输入量为各种故障现象的隶属度(量化值),输出分别表示属于不同故障的隶属度(概率)。经过这些样本训练学习,确定网络结构,并依此根据变压器新的故障现象,诊断出相应的故障状况。

5. 智能决策支持系统

智能决策支持系统是结合专家系统(ES)与管理信息系统(MIS),特别是结合决策支持系统(DSS)而形成的一个强有力的系统。对于诊断用的智能决策支持系统将不仅能判断出故障原因和故障部位,还可以结合其他信息给生产部门提供检修策略和方案,或者结合系统运行情况提供设备运行计划,为更合理、经济的生产运行提供决策服务。



第二章 电气设备的绝缘预防性试验

预防性试验是电气设备运行与维护工作中的一个重要环节,是保证电力系统安全运行的有效手段之一。电气设备的绝缘预防性试验是指对已投入运行的设备按规定的试验条件(如规定的试验设备、环境条件、试验方法和试验电压等)、试验项目和试验周期所进行的检查、试验或监测。它是判断设备能否继续投入运行,预防发生事故或设备损坏以及保证设备安全运行的重要措施。因此,我国规定,凡电力系统的设备,应根据 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》(以下简称《规程》)的要求进行预防性试验,防患于未然。

电气设备在制造、运输和检修过程中,有可能因发生意外事故而留下潜伏性缺陷。在长期运行过程中,又会受到电场、导体发热、机械力损伤与化学腐蚀作用以及大气条件的影响等,在这些外界因素的影响下,可能逐渐产生缺陷,使其绝缘性能变差,这就是通常所说的劣化。劣化的绝缘有的是可逆的,有的是不可逆的。例如,绝缘受潮后,其性能下降,但进行干燥后,又恢复其原有的绝缘性能,显然它是可逆的。再如,某些工程塑料在湿度、温度不同的条件下,其机械性能呈可逆的起伏变化,这类可逆的变化,实质上是一种物理变化,是一种没有触及化学结构的变化。若绝缘在各种因素的长期作用下发生一系列的化学、物理变化,导致绝缘性能和机械性能等不断下降,我们称这种劣化为老化,它是不可逆的劣化。例如局部放电时会产生臭氧,很容易使绝缘材料发生臭氧裂变,导致材料性能老化;油在电弧的高温作用下,能分解出碳粒,油被氧化而生成水和酸,都会使油逐渐老化。正确区分绝缘的可逆劣化和不可逆劣化,在预防性试验中具有重要意义。

为分析、判断方便,通常把绝缘缺陷分为以下两类。

(1) 集中性缺陷。指缺陷集中于绝缘的某个或某几个部分。例如局部受潮、局部机械损伤、绝缘内部气泡、瓷介质裂纹等,它又分为贯穿性缺陷和非贯穿性缺陷,这类缺陷的发展速度较快,因而具有较大的危险性。

(2) 分布性缺陷。指由于受潮、过热、动力负荷及长时间过电压的作用导致的电气设备整体绝缘性能下降,例如绝缘整体受潮、充油设备的油变质等,它是一种普遍性的劣化,是缓慢演变而发展的。

既然电气设备绝缘有缺陷,那么它的绝缘性能就要发生变化。这样,我们就可以通过某种试验手段,测量表征其性能的有关参数,以查找绝缘存在的缺陷。目前,通常采用预防性试验手段来查找,并且它已成为我国电力生产中的一项重要制度,是保证电力系统安全运行的有效手段之一。

电气设备预防性试验通常按其对被试绝缘的危险性进行分类,包括以下两类。

(1) 非破坏性试验。在较低电压(低于或接近额定电压)下进行的试验称为非破坏性试验,主要指测量绝缘电阻、泄漏电流和介质损耗因数等电气试验项目。由于这类试验施加的电压较低,故不会损伤设备的绝缘性能,其目的是判断绝缘状态,及时发现可能的劣化现象。

(2) 破坏性试验。在高于工作电压下所进行的试验称为破坏性试验。试验时在设备绝缘上加上规定的试验电压,考验绝缘对此电压的耐受能力,因此也叫耐压试验。它主要指交流耐压和直流耐压试验。由于这类试验所加电压较高,考验比较直接和严格,但也有可能在试验过程中给绝缘造成一定的损伤,故而得名。

应当指出,这两类试验是有一定顺序的,应首先进行非破坏性试验,然后再进行破坏性试验,这样可以避免不应有的击穿事件。例如进行变压器预防性试验时,当用非破坏性试验检测出其受潮后,应先进行干燥,然后再进行破坏性试验,这样可以避免变压器一开始试验就被打坏,造成修复困难。

若按试验方式进行分类,预防性试验可分为以下两类。

(1) 离线试验。即停电后将电气设备从系统中解列出来所进行的试验。这就是通常所说的预防性试验。

(2) 在线监测。它是指在不影响电气设备运行的条件下,即不停电对电气设备的运行工况和(或)健康状况连续或定时进行的监测,通常是自动进行的。为了便于区别,在《规程》中将对运行电压下的设备,采用专门仪器,由人员参与进行的测量称为带电测量。究其本质,测试都是在运行电压下进行的,只是“自动”程度不同而已。在线监测是预防性试验的重要组成部分,是发展的最高形式。

若按测量的信息进行分类,预防性试验可分为以下两类。

(1) 电气法。它是指测量各种电信息的方法。如测量泄漏电流、介质损耗因数 $\tan\delta$ 等。

(2) 非电气法。它是指测量各种非电信息的方法。如油中溶解气体色谱分析和油中含水量测定等。

预防性试验分类如图 2-1 所示。

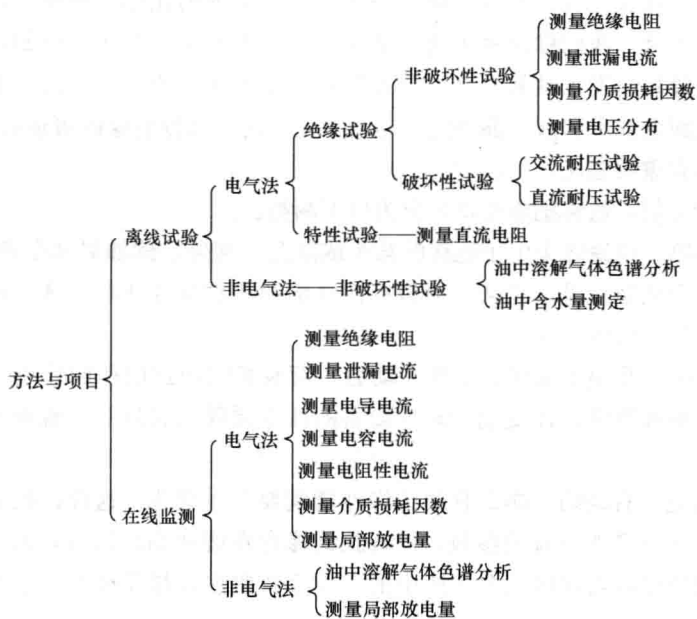


图 2-1 预防性试验分类

近二十余年来,由于电气设备故障诊断的需要以及传感技术、光纤技术、信号处理技术、计算机技术等的发展,使预防性试验中采用的新设备不断增多,新方法不断涌现,新技术不断应用,诊断技术不断提高,从而出现喜人的新局面。

(1) 新设备不断增多。纵观预防性试验采用的设备和仪器,也只是在近二十余年来才得到较大的发展。其特点是:设备小型轻便、抗干扰能力强、自动化程度高。对常用的预防性试验设备和仪器发展动向介绍如下。

1) 绝缘电阻表。绝缘电阻表通常称兆欧表,近些年来发展较快。在结构上,从机械式发展