

张建文 编著

**Fault Diagnostic
Technology
For Electrical Equipments**

电气设备 故障诊断技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

**Fault Diagnostic
Technology
For Electrical Equipments**

电气设备 故障诊断技术

张建文 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书既包含有电气绝缘基础理论和常规的故障检测方法,又适度介绍了近年来故障诊断领域中若干最新的研究进展和工程实用技术,包括:红外线、紫外线及激光成像技术在状态检测中的具体应用以及故障诊断的新理论和新方法,如模糊数学、人工神经网络、专家系统、小波变换、信息融合等。

本书不仅可以作为电气工程与自动化专业的相关专业课教材,而且可供大专、成人自学和电力、电工部门职工培训及有关技术人员参考,还可供相关专业的研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电气设备故障诊断技术/ 张建文编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2006
ISBN 7-5084-3986-4

I. 电... II. 张... III. 电气设备—故障诊断
IV. TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 095813 号

书 名	电气设备故障诊断技术
作 者	张建文 编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 11.25 印张 267 千字
版 次	2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

近年来,我国电力系统发展很快,交流 750kV 系统已于 2005 年 10 月在西北电网投入运行,±800kV 系统也在规划建设当中。技术进步不仅能够推动行业的发展,而且能够促进技术自身的发展。电力系统的快速发展,同时又促进了电力设备制造、系统运行与维护、监测监控与综合自动化等技术的不断进步。其中,电气设备状态监测与故障诊断技术就是一个典型的例子。故障诊断是根据设备运行状态信息查找故障源,并确定相应决策的一门综合性的新兴科学。它能实现设备在带负载、不停机的情况下,通过使用先进的技术手段,对设备状态参数进行监测和分析,判断设备是否存在异常或故障、故障的部位和原因以及故障的劣化趋势等,以确定合理的检修时间和方案,进而达到减少事故停机损失、提高设备运行的可靠性和经济效益、降低设备维修费用等目的。对于规模和容量越来越大、电压等级不断提高的庞大的电力系统来说,状态监测与故障诊断技术的应用,显然具有非常显著的社会、经济等多方面的意义和价值。

随着电力设备电压等级的提高、容量的增大,多年来形成的、一直发挥着重要作用的电力设备预防性试验制度,正面临着严峻的挑战。电力系统中越来越多的管理者和工程技术人员已经强烈地意识到,电力设备的维修制度由传统的预防维修发展为状态维修已势在必行。但是,至今尚未形成与《电力设备预防性试验规程》相对应的、带电或在线检测和故障诊断方面的规程。这说明,电气设备状态监测和故障诊断技术在应用和推广过程中,还有许多问题未解决。令人可喜和欣慰的是,这一领域的广大专家、学者和供电部门的现场技术人员等,一直朝着状态监测的方向做着各种努力,并不断取得新的进展和成果。在本书的编著过程中,作者一直在尝试着适度反映这些新的进展和成果。

随着我国高等教育与教学改革的不深入,专业培养计划和课程体系发生了持续的调整和更新。《电气设备故障诊断技术》课的前身,是高等院校电力系统及其自动化专业的专业课《高电压技术》。随着专业名称的变化,原来的《高电压技术》课的内容已不能满足新的培养

计划的要求,经过几次调整、补充和更新,逐渐演变为现在的《电气设备故障诊断技术》。本书在内容的编著方面,比较充分地考虑了阅读者可能没有专门学习过《高电压技术》的情况,对高电压技术的基本知识进行了概括性的介绍,作为后续知识学习的铺垫;同时,将目前比较有代表性的故障诊断新方法与新理论等进行了比较全面的介绍,并列举了部分故障诊断实例。

本书内容划分为七章:第一章绪论,对电气设备故障诊断技术的有关概念进行了介绍;第二章电气绝缘基础理论,概括性地阐述了气体、液体和固体三种绝缘介质的放电、击穿机理及其绝缘特性,简要介绍了电力系统过电压的类型及其防护措施、绝缘配合的概念和基本方法;第三章电气设备绝缘预防性试验,介绍了绝缘电阻及吸收比、直流泄漏电流、介损因数 $\tan\delta$ 、高压耐压等常规的试验项目、局部放电测量和绝缘油中溶解气体分析方法等;第四章电气绝缘在线检测与故障诊断,汇总了各种电力设备的在线检测方法;第五章红外紫外及激光成像技术在在线检测中的应用,分别介绍了这三种成像技术在电力设备热性故障、电晕及其他放电故障,以及在 SF_6 气体泄漏检测中的具体应用;第六章故障诊断的新理论和新方法,概括介绍了模糊数学、人工神经网络、专家系统、小波变换、信息融合技术等基本知识,及其在故障诊断中的应用;第七章笼型异步电机故障的信息融合诊断方法,重点介绍了判据理论的应用。

本书最初讲义文本的编写,得到了中国矿业大学校级教改项目的资助,在本书出版之际,特表示感谢!

在本书的编著过程中,得到了中国矿业大学科研基金的资助,西安交通大学电气工程学院高压教研室的张乔根教授、张冠军教授提供了部分很有参考价值的资料,受到了中国矿业大学信息与电气工程学院陈昊教授的鼓励,得到了徐州电力书店高小远经理的帮助等,在此一并表示感谢!

此外,还要感谢书中主要参考文献列出的和尚未列出的诸多专家学者,以及对本书编著出版给予各种帮助的人们!

本书的部分内容,出自作者攻读硕士、博士学位期间及后续的一些研究工作,由于作者水平有限,书中难免有不妥,甚至错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2006年6月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 故障诊断技术的产生及其作用	1
第二节 故障诊断技术在国内外的发展简况	2
第三节 故障诊断技术的构成与发展趋势	3
第四节 电气设备故障诊断技术	5
第二章 电气绝缘基础理论	7
第一节 气体介质的放电理论	8
第二节 液体介质的击穿	30
第三节 固体介质的击穿	32
第四节 组合绝缘的特性	36
第五节 绝缘的老化	37
第六节 电力系统过电压与绝缘配合	38
第三章 电气设备绝缘预防性试验	51
第一节 电介质的极化、电导与损耗	51
第二节 绝缘电阻的测量	57
第三节 直流泄漏电流的测量	58
第四节 介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的测量	59
第五节 局部放电的测量	61
第六节 绝缘油中溶解气体分析 (DGA)	63
第七节 高压耐压试验	64
第四章 电气绝缘在线检测与故障诊断	67
第一节 绝缘预防性试验综述	67
第二节 电容型试品的在线检测	71
第三节 避雷器的在线检测	74
第四节 绝缘子的在线检测	80
第五节 变压器绝缘的在线检测	82
第六节 电力电缆绝缘的在线检测	90
第七节 串级式电压互感器绝缘的带电测试	92

第八节	少油断路器的带电测试	94
第九节	高压旋转电机绝缘的在线检测	95
第十节	绝缘在线监测系统	97
第五章	红外紫外及激光成像技术在在线检测中的应用	99
第一节	采用红外成像技术检测电力设备热故障	100
第二节	采用紫外成像技术检测电力设备放电故障	108
第三节	激光成像技术在 SF ₆ 气体泄漏检测中的应用	109
第六章	故障诊断的新理论和新方法	112
第一节	故障诊断的一般性方法	112
第二节	人工神经网络在故障诊断中的应用	123
第三节	专家系统及其在故障诊断中的应用	131
第四节	小波变换在故障诊断中的应用	135
第五节	信息融合技术在故障诊断中的应用	142
第七章	笼型异步电机故障的信息融合诊断方法	152
第一节	笼型异步电机故障及其判据	152
第二节	转子断条故障的诊断	154
第三节	绕组匝间短路故障的诊断	161
第四节	气隙偏心故障的诊断	164
第五节	变频调速电机的故障诊断	164
第六节	电机故障的信息融合诊断模型	166
参考文献		174

第一章 绪 论

第一节 故障诊断技术的产生及其作用

故障诊断是根据设备运行状态信息查找故障源,并确定相应决策的一门综合性的新兴科学。它能实现设备在带负载、不停机的情况下,通过使用先进的技术手段,对设备状态参数进行监测和分析,判断设备是否存在异常或故障、故障的部位和原因以及故障的劣化趋势等,以确定合理的检修时间和方案。由于减少了事故停机损失,提高了设备运行的可靠性和经济效益,降低了维修费用,故障诊断技术(fault diagnostic technology)的优越性已为越来越多的管理人员、技术人员所共识。

一、故障诊断技术的产生与发展背景

故障诊断技术是20世纪60年代后期首先在美国出现的。其最初的目的是用于对航天、核能、军事装备等进行早期异常检测。因为这些设备往往要求具有很高的安全性和可靠性(所谓的可靠性,是指设备在规定的时间内、规定的条件下完成规定功能的能力)。实际上,故障诊断技术是人们在社会生产实践中付出了沉重的经济代价后的自然产物。第二次世界大战中,美国运往远东的设备几乎有半数未经使用就失效了,由于故障而损失的飞机数量有21000架,是被击落的2.5倍;美国三里岛核电站1979年3月29日由于系统误判断和误操作,使反应堆芯严重损坏,放射性物质逸出,经济损失高达几十亿美元,同时引起住地居民的抗议和示威;1986年1月,美国挑战者号航天飞机因火箭密封系统故障造成了失事悲剧……面对突发的灾难和巨大的经济损失,人们逐步认识到:现代化设备的故障先兆必须早期预报,以防患于未然,否则会产生严重的后果!随着计算机和电子技术等的发展,生产装备不断向着大型化、高速化、连续化和自动化方向发展,因而设备复杂性加剧,成本昂贵,出现事故损失大,影响大;即使是正常维修,也会产生很大的设备维修量和维修费用。

总之,设备的重要性、现代化、安全性、可靠性以及维修的迫切需要,使故障诊断技术应运而生。

二、故障诊断技术促进了设备维修方式的变革

故障诊断技术自20世纪70年代兴起以来,在各产业部门和技术领域发展很快,并取得了很大成效,促进了设备维修体制的一次变革。随着科学技术的不断发展,生产设备的维修体制先后经历了以下三种方式:

- (1) 事后维修(breakdown maintenance):等到设备无法正常工作时再进行维修。
- (2) 预防维修(preventive maintenance):预先制定计划,定期进行检修和更换。
- (3) 状态维修(condition/predictive maintenance):根据设备状态来确定维修工作的

内容和时间、制定维修方案。

故障诊断技术的产生和应用,使设备维修体制由传统的事后维修和预防维修方式逐步变为状态维修(或预知维修),从而减少了事故停机损失,提高了设备运行的可靠性,降低了维修费用。

三、故障诊断技术延长了设备服役寿命

所有设备在整个服役期限内,发生故障的次数和使用时间之间具有宏观上的分布规律。设备故障率—使用寿命的关系曲线如图 1-1 所示,横坐标为设备服役时间,纵坐标为设备故障率。

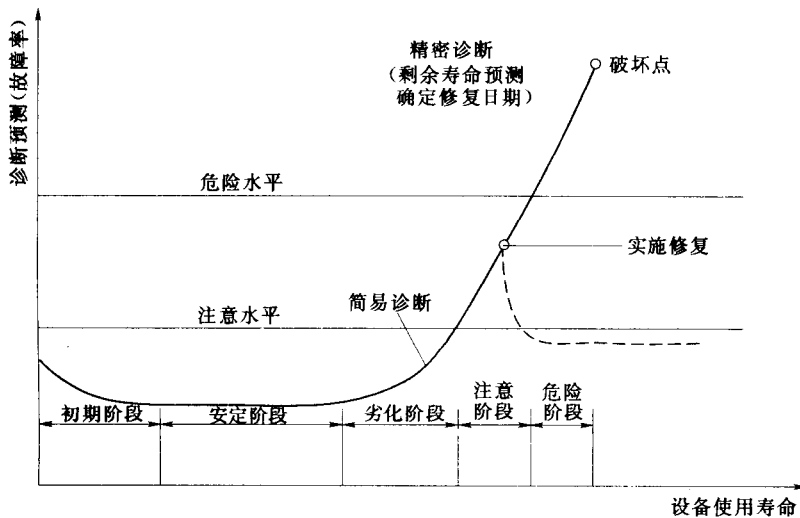


图 1-1 设备故障率—使用寿命曲线

图 1-1 所示的设备故障率—使用寿命曲线可分为以下三段:

(1) 初期阶段:故障率较高。原因有两方面:①设备刚刚投运时,必然会暴露出制造、安装和调试中遗留的问题;②相关人员对设备的操作和维护还需要有一个适应和熟悉的过程。

(2) 稳定期:制造、安装和调试中遗留的问题得到解决,故障率很低,一般是突发性故障。

(3) 劣化期:设备逐渐老化,故障率开始上升。

通过故障诊断,可根据设备状态做出相应的维修方案和采取相应的措施,以排除故障和隐患,使设备恢复原有性能,重新进入低故障率的稳定期,这样就延长了设备的使用寿命。如图 1-1 中虚线所示。

第二节 故障诊断技术在国内外的发展简况

随着现代科学技术的不断发展,生产装备不断向着大型化、高速化、连续化和自动化的方向发展,因而设备复杂性加剧,成本昂贵;维修量大,维修费用高;出现事故损失

大,影响大。生产设备的这些特点和要求有力地促进了故障诊断技术的发展。

一、国外发展概况

1967年4月18~19日,由美国宇航局(NASA)创导,在美国海军研究室(ONR)主持下,成立了美国机械故障预防小组(MFPG)。这是世界上最早从事故障诊断技术研究的组织机构。英国以及欧洲其他国家(如丹麦、瑞典等国)也相继开展了此项工作;亚洲的日本在钢铁、化工、交通、电力等产业部门也积极开展故障诊断方面的研究工作,许多技术得到了成功的应用。

二、国内发展概况

在中国,故障诊断技术的研究始于20世纪70年代末期。1983年国家经济委员会制定的《国营工业交通设备管理试行条例》中规定:“根据生产需要,逐步采用现代故障诊断和状态监测技术,发展以状态维修为基础的预防性维修。”20世纪80年代初,国内一些重点大学(如西安交通大学、东北工学院等)相继成立了故障诊断研究室,其他一些著名大学也陆续展开了这方面的基础研究和应用技术开发等工作;1987年,中国振动工程学会成立了故障诊断分会。目前,国内很多200MW以上的汽轮发电机组都装有以安全监视为目的的旋转机械状态监测系统。

目前,故障诊断技术已经成为世界各国诸多生产领域的研究热点,其应用不仅在其最初产生的军事、航天、核能等领域继续深入,而且在钢铁、化工、交通、电力、机械制造等产业部门广泛且深入地展开。故障诊断的具体对象包括:火力和水力发电机组、电力变压器、高压断路器、电动机、变电站、电力网、核电站等电气设备和系统;大型回转机械、往复机械、工程机械、滚动轴承、齿轮变速箱等机械设备和机械零部件;压缩机、液压泵站、风机、水泵、提升机等动力设备;锅炉、凝汽器、内燃机等热力设备;汽油和柴油发动机、电力机车、船舶动力系统、飞机变流器等交通运输工具及设备;高炮电气随动系统、自行火炮瞄准装置、水泥生产集散控制系统、计算机控制系统、轧钢生产线等控制系统;数控机床、电子部件、电路板、数字电路等精密设备和精细装置;航空火力控制系统、液体火箭发动机、卫星等航天航空设备。甚至还出现了基于互联网的设备故障远程诊断系统,以及校园网等局域网的自身故障诊断等。

第三节 故障诊断技术的构成与发展趋势

一、故障诊断技术的构成

故障诊断技术发展到今天,已成为一门独立的跨学科的综合信息处理技术,它以可靠性理论、信息论、控制理论和系统论为理论基础,以现代测试仪器和计算机为技术手段,结合各种诊断对象(系统、设备、机器、装置、工程结构、工艺过程等)的特殊规律而逐步形成一门新兴学科。

故障诊断技术大体上由以下三部分组成:

(1) 故障诊断机理的研究:即故障诊断物理、化学过程的研究。例如对电气、机械部件失效的腐蚀、蠕变、疲劳、氧化、断裂、磨损等理化原因的研究。

(2) 故障诊断信息学的研究:主要研究故障信号的采集、选择、处理和分析过程。例

如通过传感器采集设备运行中的信号（如振动、转速），再经过时域和频域上的分析处理，来识别和评价设备的状态和故障。

（3）诊断逻辑和数学原理方面的研究：主要是通过逻辑方法、模型方法、推论方法及人工智能方法等，根据可观测的设备故障表征来确定下一步的检测部位，最终分析判断故障发生的部位和产生故障的原因等。

在实现故障诊断的过程中，需要应用以下四项技术：

（1）检测技术：准确采集反映设备状态的信号和参数。

（2）信号处理技术：将现场采集到的各种信号，经过各种变换，把反映设备状态的真正信息提取出来。

（3）识别技术：根据掌握的故障征兆信息和状态参数，判断故障并找出原因。

（4）预测技术：对已识别出来的故障进行预测，预测故障的发展趋势和设备的剩余寿命。

目前，由于故障诊断具体应用领域和应用对象的不同，形成了各种各样的方法和技术。故障诊断方法的划分和归类也不太统一。例如，按照诊断环境、检测手段、诊断方法原理和诊断对象划分为四大类，每一类又细分为多种方法；或将诊断方法分为依据规则的诊断和依据样板的诊断两大类，前者又根据规则的描述方法分为逻辑诊断、模糊诊断和统计诊断三种，后者根据故障显现的不同空间分为阈值诊断（一维）、时域波形、频率特性和指纹诊断（多维）四种；或将故障诊断技术简单地分为传统的诊断方法、数学诊断方法以及智能诊断方法等。其实，不同的划分方法，都有其划分依据和合理性，只是各自划分和归类的角度不同而已。

二、故障诊断与状态监测的关系

根据故障诊断的功能和作用，要实现有效而灵敏的故障诊断，就必须对反映设备或系统工作状态的信息进行全面监测和分析，实时掌握设备基本工作状态，即进行工况监测。一般所谓的工况监测实际上就是状态监测（condition monitoring），因此本文对工况监测与状态监测不加区分。状态监测又称为简易诊断，通过监测结果与设定阈值之间的对比，仅对设备运行状态作出正常、异常或故障的判断，而对故障的性质、严重程度等不予或无法进行更加深入的诊断。可见，状态监测与故障诊断构成了设备诊断的两个阶段，状态监测是故障诊断的基础，故障诊断是状态监测的深化和提升，二者紧密相连。

从广义上说，故障诊断还应包括脱离状态监测而进行的离线故障诊断。通常，离线故障诊断是在传统的预防维修方式下开展的预防性试验基础上进行的，用于诊断故障的参数和信息主要是各种预防性试验项目的结果，以及一些不需采用特殊检测手段即可获得故障信息。长期以来，我国许多行业一直实行设备预防维修制度，形成了一系列针对不同对象的预防性试验项目和方法，在一定程度上比较有效地保障了设备的正常工作和安全运行，提高了设备的使用率和可靠性。同时也积累和建立了大量的以预防性试验结果为基础的诊断经验和判定标准，如我国电力系统实行的 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》等。另外，随着先进检测技术的发展和一些便携式分析测试仪器仪表的出现，原有的预防性试验的某些不足得到弥补，在一定程度上又提高了离线故障诊断的有效性和准确性。尽管离线故障诊断也不断地应用一些最新的方法和技术，但终究摆脱不了因“离线”

而带来的局限性，包括非直接性和非实时性。

三、故障诊断技术的发展趋势

实现故障诊断：一方面取决于故障信息源，获得真实的、足够的、相对准确的故障信息或故障征兆是判明故障原因的前提；另一方面还决定于所采用的诊断方法，即使获得了大量的、可信的故障信息或监测数据，但如果只是依靠诸如“以参数超限报警和阈值判断为主”之类的方法，同样也难以实现准确有效的故障诊断。由于设备故障在形成、发展和发生的过程中，会受到多种不确定因素的影响，所以，同一故障的外在表现形式常常呈现多样性，不同故障的表现形式却具有相似性、模糊性。因此，进行故障诊断，一方面要尽可能多地采集反映设备故障状态的信息量；另一方面，根据数量较为有限的状态信息，采用先进的分析、诊断方法和技术，准确判断和区分故障是实现故障诊断的一个关键。

目前，故障诊断技术的发展，已经越来越呈现出一种与当代前沿科学相融合的发展趋势。例如，故障诊断与以人工神经网络、专家系统和遗传算法等为代表的人工智能技术的结合，故障诊断与小波分析、模糊数学、分形几何等前沿数学的结合，以及故障诊断与信息融合技术的结合等。

第四节 电气设备故障诊断技术

一、电气设备

通常所说的电气设备主要是指电力系统中承担发电、变电、输电及用电作用的高压设备，如发电机、变压器、断路器、电压互感器、电流互感器、电容器、高压套管、避雷器以及各种电动机等。

由于电气设备一般由电路、磁路、绝缘、机械、通风和散热等多个部分组成，因而对其进行故障诊断往往涉及较多的知识领域，如高电压技术、机械诊断学、电子测量学、信息工程技术、计算机技术等。

二、故障诊断系统与继电保护的区别

电气设备的状态可以简单分为以下情况：

(1) 正常 (normal)：设备具备其应有的功能，没有缺陷或缺陷不明显，缺陷严重程度仍处于容限范围内。

(2) 异常 (abnormal)：缺陷有了进一步的发展，设备状态发生变化，性能恶化，但仍能维持工作。

(3) 故障 (fault)：缺陷发展到使设备性能和功能都有所丧失的程度。

(4) 事故 (breakdown)：功能完全丧失，无法进行工作的状态。

在电力系统中，继电保护对于保障系统的正常运行和设备的安全，具有十分重要的作用，其基本功能是：将保护装置的动作值整定到设定值，当运行参数和状态参数达到或超过整定值后，保护动作，报警或切断电路，以防止发生事故或事故扩大。继电保护的反应能力只局限于事故和严重的故障；而故障诊断的关注点是电气设备的故障阶段，即尚未发展造成事故的阶段，其目的是防患于未然。可见，故障诊断发挥作用的时段应在继电保护动作之前。如果通过故障诊断将潜伏性故障及早发现，并消灭在萌芽状态，显然这对于保

障电力系统和电气设备长期稳定的安全运行更为有利。

三、电气设备故障诊断技术的发展趋势

电气设备故障诊断技术作为故障诊断技术的一个分支，虽然有其研究和应用对象的特殊性，但在方法和理论等方面又有很多相通之处。故障诊断技术中的许多方法、理论等，都可以应用于电气设备的故障诊断，而且其发展趋势也包含着电气设备故障诊断技术的发展趋势。

目前，电气设备状态监测与故障诊断技术，已成为电力系统厂站自动化技术中的一个新领域。其中，电容型设备、电力变压器、高压断路器，以及交联聚乙烯（XLPE）电缆、金属氧化物避雷器、大型发电机等设备的在线检测与诊断，已逐步纳入到厂站自动化技术之中。随着这项技术的不断实施、推广以及逐步成熟和完善，故障诊断技术将成为电力系统综合自动化的一个重要组成部分。

第二章 电气绝缘基础理论

电气设备由绝缘材料、导电和导磁材料以及结构材料组成。与导电、导磁的金属材料相比,绝缘材料容易损坏,特别是有机绝缘材料,如绝缘纸、塑料、绝缘漆或胶等。在运行中,由于受到电、热、机械、环境等各种因素的作用,绝缘材料容易逐渐劣化,造成设备故障,引起供电中断。电气设备绝缘结构性能的好坏,往往成为决定整个设备寿命的关键所在。例如,根据对 110kV 及以上的电力变压器的事故原因的统计分析,绝缘引起的事故占事故总数的比例很高。

可从两方面考虑提高电气设备绝缘的可靠性,一方面是提高设备的质量,选用优质材料和先进工艺,优化设计,合理选择设计裕度,力求设备在工作寿命内,不发生故障,但这会导致制造成本增加。即便如此,设备在运行中,总会逐渐老化,造成性能下降,严重时仍然会引发故障。因此,另一方面还必须对设备进行必要的检查和维修。

早期电力设备采取的是事后维修方式;后来发展为对电力设备进行定期试验和维修,即预防维修。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。但预防性试验大多是“离线”(off-line)进行的,尚有许多不足之处:

- (1) 需停电进行试验,而不少重要电力设备,轻易不能停止运行。
- (2) 停电后设备状态(如作用电压、温度等)和运行中状态不一致,影响判断的准确性。
- (3) 由于是周期性定期试验和检查,而不是连续地随时监测,设备仍有可能在试验间隔期内发生故障。
- (4) 即使设备状态良好,由于按计划进行定期试验和检查,会造成人力物力浪费,甚至可能因拆卸组装过多反而造成对设备的损坏,即过度维修。

因此,目前在电力系统正在兴起以状态监测(通常是在线监测,英文为 on-line monitoring)和故障诊断为基础的状态维修。但是,不论是预防性试验,还是状态监测,都必须充分了解和掌握电气绝缘的基本电气特性。在此基础上,揭示故障形成和发生的机理,确定科学的诊断方法和手段,最终实现准确有效的故障诊断。

电气绝缘的作用是把不同电位的导体分隔开,使之在电气上不相连接,没有电流流过。在高电场作用下绝对没有电流流过的绝缘材料是不存在的,绝缘是相对的,只不过电阻很高而电导很小而已。用作电气设备绝缘的介质有气体、液体、固体及其复合介质,它们的绝缘特性各有不同,导电或放电机理也有明显区别。

第一节 气体介质的放电理论

气体是最为常见的绝缘介质，架空输电线路的绝缘就是依靠空气及其与固体介质的复合绝缘来实现的。与固体和液体介质相比，气体绝缘介质的优点是不存在老化问题，并且在放电击穿后具有完全的绝缘自恢复特性，因此使用十分广泛。

一、带电质点的产生与消失

由于宇宙射线和地球内部放射性物质的射线等作用，气体中会产生微弱的电离，从而产生少量的带电质点（标准大气条件下，空气中约有 $500 \sim 1000$ 对/ cm^3 ）。

所谓的电离（游离）是指电子脱离原子核的束缚而形成自由电子和正离子的过程。电离所需要的能量，称为电离能 W_i ，单位为电子伏特（eV）；也可用电离电位 $U_i = W_i/e$ 表示。

（一）电子与正离子的产生

1. 热电离

热电离是热状态下发生的电离。常温下，发生的概率很低；在温度为 1000K 以上，热电离才开始出现。

2. 光电离

光电离是光辐射引起气体分子的电离过程。设光频率为 γ ，普朗克常数 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ，则发生光电离的条件为：

$$W \geq W_i \text{ 或 } h\gamma \geq W_i$$

在所有气体中金属铯蒸气的电离电位最低，为 $U_y = 3.38\text{V}$ ，对应发生光电离的临界波长为 $\lambda \leq 3184\text{\AA}$ ；而可见光的波长范围为 $4000 \sim 7000\text{\AA}$ ，故可见光是不可能产生光电离的。

需要说明的是，当带电质点复合时，会以光子的形式释放电离能，而被释放的光子可能引发新的光电离。光电离是气体放电过程中的一种重要的电离形式。

3. 碰撞电离

碰撞电离是高速运动的带电质点与中性原子或分子发生碰撞而引发的电离。

设两次碰撞之间质点平均移动的距离，即平均自由行程为 x ，则碰撞电离条件为：

$$\vec{F} \cdot \vec{x} = \frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \text{ 或 } Fe x \geq W_i, \text{ 即 } x \geq \frac{W_i}{eE} = \frac{U_i}{E}.$$

在气体放电过程中，由电子引发的碰撞电离是产生带电质点的最重要的方式。

4. 分级电离

分级电离是原子或分子在激励状态下再获得能量而引发的电离。通常发生分级电离的概率很小。

（二）电极表面的电子逸出（表面电离）

电子从金属表面逸出所需要的能量称为逸出功，其能量来源主要有：

（1）正离子撞击阴极。

（2）光电子发射（光辐射），例如紫外线照射引起的光电子发射等。

(3) 强场发射 (冷发射), 当金属表面电场强度很大时较易发生。

(4) 热电子发射 (高温下)。

(三) 气体中负离子的形成

气体中负离子形成的主要方式: 电子附着在具有强电负性的中性质点上。

负离子的形成, 使自由电子数减少, 对放电发展起抑制作用。由于 SF_6 气体具有很强的电负性, 易形成负离子, 因此 SF_6 气体具有很高的耐电强度 (SF_6 的 $E_b = 89\text{kV/cm}$, 空气的 $E_b = 30\text{kV/cm}$) 并得到日益广泛的应用。

(四) 带电质点的消失

(1) 带电质点在电场作用下定向运动, 消失于电极中, 形成回路电流。

(2) 扩散: 由于分子的热运动, 带电质点由浓度高的区域移向浓度低的区域。

(3) 复合: 在一定条件下异性带电质点相遇中和, 还原为中性质点。

二、放电的电子崩阶段

(一) 非自持放电和自持放电的不同特点

对于一均匀电场, 假设在外电离因素作用下, 间隙中的气体含有微量的带电质点。随着外加电压的变化, 间隙中的放电具有不同的特点。

1. 非自持放电

随着外加电压的增大, 电流不断增大, 在增大到一定程度后, 进入饱和阶段 (电压增大, 电流并不随之增大), 并在一定阶段内得到维持。但去掉外电离因素, 放电不能维持 (无电流)。

2. 自持放电

在放电过程中, 去掉外电离因素, 放电能够继续维持。常见的自持放电形式主要有:

(1) 辉光放电: 低气压下的气体放电, 如荧光灯。

(2) 火花放电: 常压或高气压下, 外回路阻抗较大。

(3) 电弧放电: 外回路阻抗很小, 放电电流很大。

(4) 电晕放电: 一般发生在金属电极表面。

非自持放电和自持放电的根本区别在于: 放电的维持是否取决于外电离因素的存在。至于放电是否意味着间隙被击穿, 还取决于其他条件。

(二) 电子崩的形成

在电场作用下, 电子在向阳极运动的过程中不断发生碰撞电离, 自由电子数目呈几何指数不断增加, 这一过程好像“雪崩”一样, 因此将所形成的电子流称为电子崩。图 2-1 为电子崩的示意图。

为定量描述电子崩发展的程度, 定义电子碰撞电离系数 α : 一个电子沿电场方向移动 1cm 平均发生的碰撞电离次数。

以平板均匀电场为例来计算电子崩形成的电流, 如图 2-2 所示。

设 n_0 为阴极处的初始自由电子数, 到达距阴极板距离为 x 处的电子数为 n , 则

$$n = f(n_0, \alpha, x)$$

设距离为 x 处再经过 dx 距离, 增加的电子数目为 dn , 则

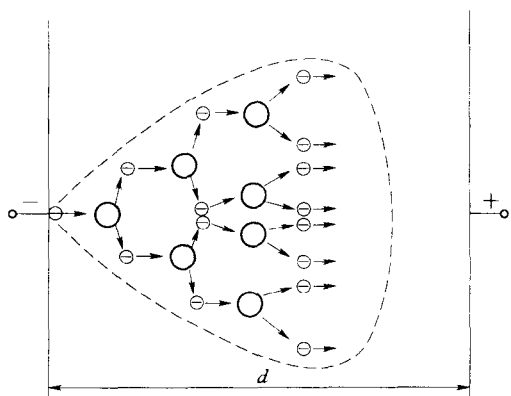


图 2-1 电子崩的示意图

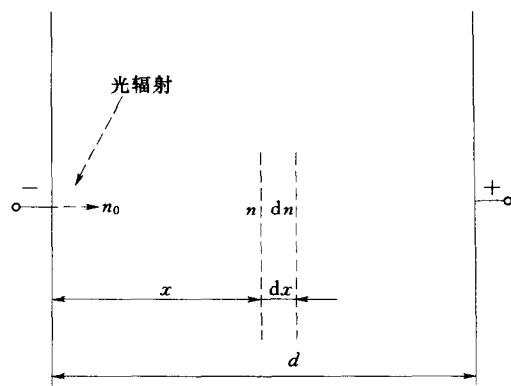


图 2-2 电子崩电流计算示意图

$$dn = (\alpha dx)n = \alpha n dx$$

$$\int_{n_0}^n \frac{1}{n} dn = \int_0^x \alpha dx, \text{ 得 } n = n_0 e^{\alpha x}$$

当 $x = d$ 时, 到达阳极的电子数目为

$$n(d) = n_0 e^{\alpha d}$$

$$\frac{dn(d)}{dt} = \frac{dn_0}{dt} e^{\alpha d} \Rightarrow I = I_0 e^{\alpha d}$$

上式表明: 当电压增大时, 电子碰撞电离系数 α 增大, 电子崩的电流以指数规律增长; 当 $n_0 = 0$ 时, $I_0 = 0$, $I = 0$, 放电不能自持。故仅有 α 过程, 并不能产生自持放电。

三、自持放电的条件

要达到自持放电, 必须在初始电子崩消失以前, 有新的电子产生来取代外电离因素产生的初始电子, 即所谓的二次电子发射。

实验表明: 二次电子的产生机制与气压 p 和间隙距离 d 的乘积 pd 有关。 pd 较小时, 用汤森理论 (Townsend Theory) 来说明; pd 值较大时, 用流注理论来说明 (Streamer Theory)。这两个理论是关于气体放电机理的基本理论, 对于空气来说, 两者的分界线大约是 $26 \text{ kPa} \cdot \text{cm}$ 。

(一) pd 值较小的情况

汤森理论的基本观点是: 二次电子的来源是正离子撞击阴极表面, 使其表面发生电子逸出。与 α 系数相对应, 定义 γ 系数: 一个正离子撞击阴极, 从阴极上逸出电子数目的平均值。

从理论上说, 在放电过程中, 还可能存在着正离子发生碰撞电离的系数 β , 但通常可忽略。均匀电场中汤森自持放电判据为:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \Rightarrow \gamma e^{\alpha d} \approx 1 \Rightarrow \alpha d \approx \ln \frac{1}{\gamma}$$

1. 汤森理论的推论 (Townsend Theory)

设电子的平均自由行程为 λ , 则一个电子移动 1 cm 发生碰撞次数为 $1/\lambda$ 。

参照图 2-2, 设 $x=0$ 时, 对应的电子数为 n_0 , 对于任意距离 x , 没有发生碰撞的电子数为 n , 对距离 $x + dx$, 没有发生碰撞的电子数为 $n + dn$ 。则