



变压器分接开关 状态监测与故障诊断

张德明 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

书中的内容依据国际电工委员会修改颁布的 IEC 60214-2—2004 和国家刚颁布的 GB/T 10230.2—2007《分接开关 第2部分：应用导则》标准，对变压器分接开关的状态监测和故障诊断进行了系统全面介绍。书中重点阐述分接开关出厂试验、交接验收试验等原始数据的检测，分接开关预防性试验、巡视检查、在线监控和在线监测的状态监测，有载分接开关的机械故障、电气故障、绝缘故障、油室渗漏、电动机构故障、附件故障和无励磁分接开关故障的诊断和复合故障的综合诊断，并提出解决措施。

本书既可作为从事分接开关研究、设计、制造和使用运行的专业技术人员参考书，也可作为高等工科院校电气和电力专业师生的参考教材，还可作为电力、化工、冶金等检修部门的专业人员的培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器分接开关状态监测与故障诊断 / 张德明编著. —北京：中国电力出版社，2008
ISBN 978-7-5083-6410-0

I. 变… II. 张… III. ①变压器-分接开关-检测 ②变压器-分接开关-故障诊断
IV. TM403.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 184567 号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

责任编辑：齐伟 责任印制：陈焊彬 责任校对：王瑞秋

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2008年4月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·31.25印张·766千字

定价：59.80元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

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

本社购书热线电话 (010-88386685)



序

分接开关的作用是什么？鲜为人知，通常认为，分接开关充其量不过是个变压器的组件，它的调压、联网与调节负荷潮流、节能等功效常被人遗忘。因而，它没有真正地享受到像高压断路器这类主机的应有待遇。殊不知变压器是静态变电设备，而分接开关因调压需要是变压器中唯一动作频繁的机械与电气结合一体的产品，随着调压次数的增多，其操作不良和故障率也相应增加，很容易就会出现烧毁而停电事故的发生，运行风险特别大。它与高压断路器相比，结构复杂，寿命要求高，加工工艺又强，用料相应多，但它毕竟是辅机，所卖价格却比相同电压等级的主机低很多。因此，国内的分接开关要不要上马？是靠自力更生制造，推进国产化，还是大量进口呢？这些问题从20世纪70年代开始就争论不休。

20世纪70~80年代，国内变电制造行业配套的分接开关几乎被国外公司所垄断，供货条件的挑剔与苛刻，使一批输变电行业有志之士，出于民族的责任感，大声疾呼“中国一定要有自己的分接开关”。由此我和志同道合的同事，情为国所系，利为国所谋，竟把此呼吁当作自己的使命，在研发和应用分接开关上付出自己的毕生精力与青春，吃尽了苦头。当然这并不是后悔我们自己做了事倍功半之业，而是经过几十年的努力后的今天，特别是近年来随着改革开放的深入发展，市场经济驱使国内的分接开关制造企业加快技术改造与技术创新，分接开关制造技术水平有了长足的进步。更可喜的是技术创新突破了简单模仿国外同类产品的方式，根据30余年的制造经验并结合中国的实际状况，开发出了一批拥有自主知识产权的新产品。这不仅表现为分接开关性能的提高，更代表了我国的分接开关设计理念、研发创新、制作工艺、产能力量、试验手段和理论研究等综合实力已经不落后于国际先进水平。

张德明先生受中国电力出版社的再次委托，编著《变压器分接开关状态监测与故障诊断》专业技术一书。本书作为分接开关系列丛书之三，对分接开关安全可靠运行、分接开关状态监测和故障诊断有着现实的指导意义。由于分接开关的长期运行，故障和事故总不可能完全避免，且引发故障和事故又出于众多方面的原因。因此，作者比较系统地编写了分接开关状态监测技术，故障类型、故障特征与综合判断的方法，故障缺陷和事故的处理与预防纠正措施，力求从实用性出发，将分接开关故障诊断的实践与应用理论相融合。读者不仅可以了解分接开关运行状态监测与故障诊断的特点，还可以了解分接开关状态监测和故障诊断的最新发展动态以及一些比较前沿并深受关注的检测技术。

分接开关产品与分接开关技术的发展是无止境的，作为分接开关的制造企业愿听行业内外各方面专家的意见，为中国的分接开关和民族工业的发展做出应有的贡献。借此机会，对

关怀和支持国产分接开关发展的业内专家与领导再次表示真诚的谢意。对中国分接开关的创业与创新做出贡献的同事们深表敬意。最后再次呼吁，各级政府和有关产业部门对国产分接开关制造业给予政策的支持与关怀。

上海华明电力设备制造集团公司 肖日明

各位领导、各位专家、各位同事：大家好！今天，我们在这里举行“中国分接开关”研讨会，我感到非常荣幸。首先，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示衷心的感谢。其次，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示诚挚的问候。最后，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示衷心的祝愿。中国分接开关的发展，离不开各位领导、各位专家、各位同事的支持与关怀。我们将继续努力，为国产分接开关的发展做出更大的贡献。

各位领导、各位专家、各位同事：大家好！今天，我们在这里举行“中国分接开关”研讨会，我感到非常荣幸。首先，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示衷心的感谢。其次，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示诚挚的问候。最后，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示衷心的祝愿。中国分接开关的发展，离不开各位领导、各位专家、各位同事的支持与关怀。我们将继续努力，为国产分接开关的发展做出更大的贡献。

各位领导、各位专家、各位同事：大家好！今天，我们在这里举行“中国分接开关”研讨会，我感到非常荣幸。首先，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示衷心的感谢。其次，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示诚挚的问候。最后，我要向各位领导、各位专家、各位同事表示衷心的祝愿。中国分接开关的发展，离不开各位领导、各位专家、各位同事的支持与关怀。我们将继续努力，为国产分接开关的发展做出更大的贡献。

前 言

随着国民经济的高速发展和人民生活水平的不断提高,对电力系统的安全稳定地供电提出了越来越高的要求。当前,电力设备担负着保证电力系统安全供电的重要任务,其运行状态对电网的可靠性影响很大,特别是高电压、大容量的电力设备一旦出现故障,往往会造成巨大的经济损失和严重的社会影响。因此,提高电力设备的运行可靠性具有重要的意义。

分接开关是变压器完成调压的核心部件。变压器是静态的变电设备,而分接开关因调压需要是变压器中唯一频繁操作的机械与电气结合一体的设备。随着调压次数的增多,其操作不良和故障率也相应增加。由此可知,为了确保分接开关安全可靠地运行,开展分接开关状态监测和故障诊断势在必行。

2004年10月,国际电工委员会《分接开关应用导则》的新标准正式颁布了。IEC 60214-2(2004)《分接开关 第2部分:应用导则》在IEC 542—1989《有载分接开关应用导则》基础上进行了实质性的重大修改,其中对分接开关运行提出了一些状态监控新的观念,这对分接开关安全运行有着现实的指导意义。作者根据IEC 60214-2《分接开关

第二部分:应用导则》内容的消化和粗浅理解,结合国情和大量运行信息的反馈,对分接开关状态监测与故障诊断也提出一些新的尝试观点。同时,为了推动分接开关状态监测与故障诊断技术的发展,本文拟就此一吐拙见,以期抛砖引玉。

分接开关状态监测与故障诊断技术是具有交叉学科性质的一门新兴技术。分接开关状态监测与故障诊断比变压器难度大,且起步也较晚。尤其是分接开关在线监测在国内尚属“空白”状况,而国外也仅处在起步状态。由于各种监测特征量和分接开关状态并不一一对应,而具有错综复杂的关系。因此,分接开关的运行状态监测与故障诊断现仍处于研究试行、积累经验的起步阶段。

全书共分为3篇共计16章。原始数据检测篇,是根据分接开关试验的分类加以介绍的:第1章介绍分接开关出厂试验;第2章介绍分接开关型式试验;第3章介绍分接开关交接验收试验。状态监测篇,是根据状态监测方式加以介绍的:第4章介绍分接开关预防性试验;第5章介绍分接开关巡视检查;第6章介绍分接开关常规在线监控;第7章介绍分接开关在线监测。故障诊断篇,是根据分接开关不同类型故障诊断加以介绍的:第8章介绍分接开关故障特征;第9章和第10章分别介绍有载分接开关机械故障和电气故障的诊断;第11章介绍有载分接开关绝缘故障的诊断;第12章介绍有载分接开关油室密封渗漏的诊断;第13章介绍电动机构故障的诊断;第14章介绍无励磁分接开关故障的诊断;第15章着重介绍附件故障的诊断;第16章介绍分接开关故障的综合诊断。

本书可作为从事变压器和分接开关研究、设计、制造、使用和运行检修专业技术人员的

参考书,也可用作高等院校电气和电力专业的参考教材以及电力、电气、化工、冶金、轨道交通等部门专业技术人员的培训教材。

在本书编写中,查阅了大量的资料和文献,收集了各地近年来大量的变压器分接开关运行故障案例,并进行了分析、加工和整理;参考了许多专业工作者和有关专家提供的实例、经验及公开发表的文章、正式书籍和资料;引用了有关作者的研究成果、试验数据和故障典型案例与分析。谨在此向他们表示衷心的感谢。同时承蒙上海华明电力设备制造集团开创者肖日明董事长的鼓励 and 大力支持,得到华明集团公司领导张惠国先生和蔡玲玲、杨建琴、曹萍3位女士以及销售部张文国、技术服务部贺宗尧和唐伟鸣、计算室沙贝利帮忙以及同仁刘刚、章宏仁等的帮助。在此一并表示诚挚的谢意。

本书编写时间仓促,且编者学识水平有限,书中疏漏欠妥之处在所难免,热忱地欢迎各位专家和读者批评指正。

张德明

目 录

序 前言

绪论	1
1 状态监测与故障诊断的任务	1
2 状态监测	3
3 状态诊断	6
4 运行状态分类	7
5 状态检修	7

第1篇 分接开关原始数据检测

第1章 分接开关出厂试验	11
1.1 外观检查	12
1.2 触头参数测量	13
1.3 导电回路直流电阻测量	15
1.4 转动力矩测量	26
1.5 触头动作顺序试验	27
1.6 机械运转试验	31
1.7 压力及真空试验	33
1.8 绝缘试验	34
1.9 电动机试验	37
1.10 控制器或显示器试验	39

第2章 分接开关型式试验	40
2.1 分接开关干燥处理后功能试验	40
2.2 绝缘试验	41
2.3 机械试验	43
2.4 油室密封试验	46
2.5 切换试验	46
2.6 过渡阻抗试验	54
2.7 短路电流试验	56
2.8 触头温升试验	57
2.9 电动机和控制器试验	57
2.10 特殊试验	60

第3章 分接开关交接验收试验	62
3.1 概述	62
3.2 变压比试验	64
3.3 接线组别试验	67
3.4 绕组直流电阻试验	69
3.5 负载试验	72
3.6 绝缘特性试验	75
3.7 绝缘强度试验	85
3.8 分接开关绝缘强度的考核	95
3.9 有载调压装置的试验和检查	111
3.10 额定电压下的冲击合闸试验	116

第2篇 分接开关状态监测

第4章 分接开关预防性试验	119
4.1 概述	119
4.2 油中溶解气体的色谱分析 (DGA)	121
4.3 电流回路直流电阻的检测	142
4.4 运行中的油质试验	145
4.5 真空灭弧室试验	152
4.6 SF ₆ 气体试验	158
4.7 绝缘试验	166
4.8 分接开关试验与检测	168

第5章 分接开关巡视检查	171
5.1 巡视检查项目	171
5.2 变压器巡视检查内容	175
5.3 分接开关巡视检查内容	176

第6章 分接开关常规在线监控	179
6.1 分接开关油室压力上升的监控	179
6.2 分接开关气室压力上升的监控	185
6.3 分接选择器油室压力升高的监控	188
6.4 变压器的差动保护	192
6.5 变压器的后备保护	194

6.6	分接开关自动调压的监控	198	第 11 章	有载分接开关绝缘故障的诊断	345
6.7	分接开关并联运行的监控	201	11.1	概述	345
6.8	多柱式分接开关的联动监控	210	11.2	分接开关过电压绝缘故障及其 诊断	346
6.9	分接开关油室渗漏监控	212	11.3	分接开关油绝缘故障及其诊断	351
第 7 章	分接开关在线监测	215	11.4	分接开关固体绝缘故障及其诊断	355
7.1	分接开关油中溶解气体的在线 监测	215	11.5	分接开关绝缘受潮故障及其诊断	359
7.2	分接开关绝缘的在线监测	225	11.6	分接开关绝缘配合不当的故障及其 诊断	364
7.3	分接开关机械性能的在线监测	240	11.7	额定电压下空载冲击合(分)闸 引发故障及其诊断	368
7.4	分接开关电气性能的在线监测	258	第 12 章	有载分接开关油室密封渗漏的诊断	376
第 3 篇	分接开关故障诊断		12.1	概述	376
第 8 章	分接开关故障特征	267	12.2	分接开关油室严重漏油故障及其 诊断	377
8.1	分接开关故障类型	267	12.3	分接开关油室密封件缺陷及其诊断	380
8.2	分接开关故障特征与概率	268	12.4	分接开关油室密封结构缺陷及其 诊断	385
8.3	不同型号分接开关故障的状况	271	12.5	分接开关储油柜结构缺陷及其诊断	392
第 9 章	有载分接开关机械故障的诊断	276	第 13 章	电动机构故障的诊断	395
9.1	紧固件松脱的故障及其诊断	276	13.1	概述	395
9.2	快速机构的动作故障及其诊断	282	13.2	电动机构越级连动故障及其诊断	397
9.3	触头动作顺序故障及其诊断	288	13.3	电动机构机械传动缺陷及其诊断	399
9.4	触头变换程序缺陷及其诊断	292	13.4	电动机构电气控制缺陷及其诊断	403
9.5	超越终端与断轴故障及其诊断	297	13.5	电动机构位置指示缺陷及其诊断	406
9.6	零部件机械故障及其诊断	301	13.6	电动机构箱体密封故障及其诊断	409
第 10 章	有载分接开关电气故障的诊断	306	13.7	伞齿轮与传动轴故障及其诊断	410
10.1	分接开关触头接触不良的潜伏性 故障及其诊断	306	第 14 章	无励磁分接开关故障的诊断	414
10.2	分接开关触头过热故障及其诊断	310	14.1	概述	414
10.3	分接开关低能量放电故障及其诊断	317	14.2	无励磁分接开关机械故障及其	
10.4	分接开关转换选择器操作期间 悬浮放电及其电位连接	321			
10.5	分接开关高能量放电故障及其诊断	330			
10.6	分接开关放电兼过热故障及其诊断	335			
10.7	分接开关切换负载故障及其诊断	340			

诊断	415	15.4 保护继电器故障及其诊断	439
14.3 无励磁分接开关电气故障及其 诊断	417	15.5 压力释放装置故障及其诊断	445
14.4 无励磁分接开关绝缘故障及其 诊断	425	15.6 有载分接开关在线滤油装置故障 及其诊断	449
14.5 无励磁分接开关安装错位及其 诊断	429		
第 15 章 附件故障的诊断	433	第 16 章 分接开关故障的综合诊断	451
15.1 概述	433	16.1 概述	451
15.2 电子式控制器故障及其诊断	433	16.2 分接开关故障的综合诊断方法	451
15.3 电子式分接位置显示器故障及其 诊断	437	16.3 潜伏性故障的综合诊断	461
		16.4 突发性故障的综合诊断	476
		参考文献	484

绪 论

电压是电力系统中一项重要的电能质量指标。由于用电负荷随时随地发生变化的,所以电压的波动是不可避免的。为稳定电网电压、联络电网、调节负载潮流,就需要对变压器进行电压的调节。

变压器调压主要是改变分接绕组的抽头位置来实现的。连接和切换变压器分接抽头装置,通常称为分接开关。切换分接抽头必须将变压器从网路中切除,即不带电切换调压,称为无励磁调压,所采用的分接开关称为无励磁分接开关;切换分接抽头不须将变压器从网路中切除,即带负载切换调压,称为有载调压,所采用的分接开关称为有载分接开关。

分接开关不仅是保证电力系统供电质量、联络电网、调节负载潮流、无功分配、挖掘电力设备有功和无功出力的必不可少的关键电气设备之一,而且在石油化工、矿山冶金、轨道交通等部门用于调节负载(电压、电流和功率),起到提高电能质量、节电和节能效果的作用。因此,分接开关在国民经济各部门使用和推广,对电力系统的经济运行和保证工农业生产都有重要的意义。

分接开关是变压器完成调压的核心部件,也是变压器重要配套的组件之一。变压器是静态的变电设备,而分接开关因调压需要是变压器中唯一频繁操作的电气设备。由此可知,为了确保分接开关安全可靠地运行,开展分接开关状态监测和故障诊断势在必行。

1 状态监测与故障诊断的任务

随着国民经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高,对电力系统的安全稳定运行提出了越来越高的要求。当前,电力设备担负着保证电力系统安全供电的重要任务,其运行状态对电网的可靠性影响很大,特别是高电压、大容量的电力设备一旦出现故障,往往会造成巨大的经济损失和严重的社会影响,因此,提高电力设备的运行可靠性具有重要的意义。

提高变电设备的可靠性,尤其是分接开关的可靠性,就必须对设备进行必要的检查和维修。早期实行的是事故检修,采取不坏不修,坏了再修的事后检修方式。其后,发展为定期检查试验和检修,即传统的预防性检修。分接开关运行状态的好坏与设备本身的材料质量、制造质量、安装和检修质量、运行条件和环境影响都有一定的关系。由于大部分的分接开关故障都有一个性能状态改变的发展过程,因此,电力部门长期以来推行定期试验和定期检修等预防性措施,目的是提早发现分接开关状态的变化,及时消除隐患,预防事故的发生。这种预防性措施经过多年实践和经验积累不断完善,形成了电力行业必须遵守的技术规程(《电力设备预防性试验规程》DL/T 596—1996 和《有载分接开关运行维修导则》DL/T 574—1995),依据这些规程进行的预防性试验和检修工作对防止事故发生起到了很大作用。

随着电网对于电力设备可靠性要求的进一步提高和电力企业提高经济效益的需要,定期的预防性试验、定期检修和故障检修的弊端也逐渐显现出来。首先,以时间和操作次数为依据的定期预防性试验和检修没有考虑到分接开关的实际运行状态。事实上在异常的分接开关只占少数的情况下,出现了整体的分接开关过多的试验、检修和不必要的停电。这种无法避

免的计划性停电所占的比例越来越大,不仅对提高供电可靠性水平构成了障碍,而且在电力企业不断减人增效的今天,为提高经济效益带来了越来越多的负面影响;其次,以时间和操作次数为依据的定期预防性试验和检修没有考虑到分接开关的差异性,对于发生在两次试验或两次检修之间的分接开关状态变化无能为力,不能及时发现和监视一些短期内变化较大的潜伏缺陷,而这些潜伏缺陷一旦发展成为故障,同样对电网运行的可靠性构成极大的威胁。因此,电力部门迫切需求采用先进的技术手段对分接开关运行状态进行连续监测和控制,发展以状态监测和故障诊断为基础的状态检修也势在必行。

1. 状态监测

状态监测的任务是了解和掌握分接开关的运行状态。依据各种监测、试验、监视、检查、分析和判别方法和数据变化规律及趋势,结合前期出现征兆和系统的历史与现状的信息,考虑环境因素,对分接开关运行状态进行评估,判断其处于正常或非正常方式,及早发现潜伏性故障;并对运行状态进行连续或随时监控与判断、显示与记录,对异常状态作出预警,以便运行人员及时加以处理,避免预防性试验的缺点;并为分接开关的故障分析、性能评估、合理使用和安全生产工作提供信息和准备基础数据,以便确定分接开关是否需要状态检修以及该检修的项目。

状态监测基于运行的分接开关,与传统的预防性试验相比,监测时的电压高,温度高,监测结果更能反映分接开关的真实状况,更能掌握分接开关的动态,为判断分接开关的安全运行提供了更准确、更安全的依据。

2. 故障诊断

故障诊断的任务是根据状态监测的信息,结合已知的结构特征和参数以及环境条件,并考虑分接开关的运行历史记录(包括运行记录和曾发生的故障及检修记录等),对分接开关可能要发生的或已经发生的潜伏性故障进行预报和分析、判别,确定故障的性质、类别、程度、原因、部位等,指出故障发生和发展的趋势及其后果,提出控制故障继续发展和消除故障的调整、检修、治理的对策措施,并加以实施,最终使分接开关复原到正常状态。

分接开关上的不同部位、不同类型的故障,引起分接开关功能的不同变化,导致分接开关的整体及各部位状态和运行参数的不同变化。故障诊断的任务就是当分接开关上某一部位出现某种故障时,要从这些状态及其参数的变化推断出导致这些变化的故障及其所在部位。由于状态参数的数量浩大,必须找出其中的特性信息,提取特征值,才便于对故障进行诊断。由某一故障引起的分接开关状态的变化称为故障的征兆。故障诊断的过程就是从已知征兆判定分接开关上存在的故障的类型及其所在部位的过程。因此,故障诊断的方法实质上是一种状态识别的方法。

故障诊断的困难在于:一般来说,故障和征兆之间不存在简单的一一对应的关系,一种故障可能对应多种征兆,而一种征兆也可能对应多种故障,还有许多其他故障也都对应这一征兆。这就为故障诊断增加了难度。因此,通过故障诊断有一个反复试验的过程,先按已知信息提取征兆,进行诊断,得出初步结论,提出处理对策,对分接开关进行调整和试验,甚至停机检修,再启机进行验证,检查分接开关是否已恢复正常。如尚未恢复正常,则需补充新的信息,进行新一轮的诊断和提出处理决策,直致状态恢复。

综上所述,开展分接开关运行的状态监测和故障诊断对保证分接开关的安全可靠地运行具有极其重要的意义。

状态监测与故障诊断技术是具有交叉学科性质的一门新兴技术,有很大的难度。通常,各种监测特征量和设备状态并不一一对应,而具有错综复杂的关系。如果说传统预防性试验结果的分析,已经积累了大量经验,据此制定出了相应的规程,那么对于分接开关的运行状态监测诊断现仍处于研究试行、积累经验的阶段。因此,为了推动分接开关状态监测与故障诊断技术发展,本文拟就此一吐拙见,以期抛砖引玉。

2 状态监测

1. 状态监测的基础

分接开关的状态信息主要来自巡视检查、带电检测、在线监测、离线测试四条渠道。这四条渠道是状态诊断的四大技术支撑,缺一不可。状态诊断的这四大支撑常统称为状态监测。

面临来自多渠道多层次的信息,必须去伪存真,比较分析,而且对分接开关状态作出正确的诊断,不仅需要实时信息,还须有历史的状态信息,尤其是原始信息,甚至是同类分接开关“纵向与横向”的信息,以供借鉴,以知变化。显然,状态诊断是一个技术含量密集的环节,是开展状态检修必须加强的环节。可以说:状态检修开展得好坏,在很大程度上取决于诊断水平的高低。

(1) 在线监测。在线监测指的是在不影响分接开关正常运行的前提下,对分接开关工作时的状况连续或定时进行的监测,通常这些监测可以自动进行。

在线监测的主要特征是监测装置(至少是采样装置)与被监测分接开关同在生产线上运行。

据此,变压器运行时的电压、电流、温度等信息的采集都属于在线监测项目。由于这些监测结果的可信性久经考验,当它们越过某一规定界限时,不仅仅自动记录和发出信号,还常常被用于直接启动断路器掉闸。

在线监测按构成可分为集中式和分布式两种。前者通过线缆将信号传输至中央控制站;后者是仅在就地显示,也可以就地打印。还有的仅在分接开关上装传感器,有待人员手持指示仪表去测取信息数据,这种也可以称之为半在线分布式。

(2) 带电检测。带电检测指的是对在运行中的分接开关,使用专用仪器,由人员参与进行的测量。

据此定义,《电力设备预防性试验规程》DL/T 596—1996中,电力变压器的第一项试验(油中溶解气体的色谱分析)就是带电检测。红外热像分析也是带电检测。所有已经或可能实现在线监测的项目都可以带电检测。带电检测还包括若干至今尚难实现在线监测的项目。

(3) 离线测试。离线测试指的是将分接开关从电网中撤出运行,由专业测试人员使用专用仪器和试验电源(有的仪器内附试验电源)进行的测量。

离线测试的特征很明显:被试分接开关退出了网路,测试设备本不在网路上。《电力设备预防性试验规程》DL/T 596—1996中电压比、绕组直流电阻、绝缘试验等的大部分测试项目都是离线测试。

(4) 巡视检查。巡视检查,做好运行记录,历来是电气运行人员的一项主要工作,用眼看、耳听、鼻嗅、手摸来获得设备状态的信息。

因此,巡视检查这一传统的信息渠道,不仅不能放弃,还必须通过培训,提高察颜观色、嗅味听音、手触诊脉、见微知著的能力。特别要强调:既使实现了无人值班的变电所,那么定期和特殊的巡视检查也都是不可取消的。

2. 状态监测的状况

分接开关的状态应包括:在线监测的特征量、预防性试验的结果数据、历史的运行状况和检修情况,以及现在的运行参数等。状态监测指的是运行中分接开关工作状况及其演变态势的监测,也就是信息的采集。分接开关采集信息主要包括:① 出厂试验和交接试验的数据;② 设备的缺陷、事故和检修的记录历史信息;③ 定期与非定期带电检测或离线测试的试验数据;④ 在线监测传送的实时数据;⑤ 与分接开关状态相关的运行巡视信息。

在状态监测的四个技术支撑基础中,巡视检查的成本最低,其次是带电检测,在线监测的一次投入和运行成本比带电检测要高得多,而离线测试的成本是最高的。就检缺和监测的作用或功效而言,很难科学地给这四支撑基础排个次序,但它们各自的特色还是明晰的。离线测试最权威,而且离线测试的多数信息直接是分接开关的特性参数和耐受强度。带电检测和在线监测所测得的信息大多数是分接开关的表现。这个“表现”有两个含义。第一个含义是:它是激励下的响应或副产物,如运行电压下的电流、局部放电、噪声……负荷下的温升等。另一个含义是:这类信息多数反映的是分接开关表面上的现象,如触头的热、色等,常需要深入分析其内涵。巡视检查是大量信息的来源环节,当然都是“表面”现象。

因此,必须降低代价高昂的离线测试的频度,但还不能放弃任何一项;必须提高过去行之有效的巡检水平;优先增加带电检测的使用频度和加大检缺深度、广度;适度推广成熟、高效的在线监测;在已经配置了集中式在线监测的变电所,应审慎地增加在线监测内容,尽可能整合成一个监测系统,有效采集信息,提高检缺功能。

随着电气设备的状态维修的普及,一种新的状态监测技术,已成为国内外电气设备技术工作者关注的研究热点。20世纪70年代,输变电设备状态监测技术处于最初的带电测试阶段,仅仅是为了不停电而对电气设备的某些参数进行直接测量。其结构简单,测试项目少,测试灵敏度较差,应用范围较小。从20世纪80年代开始,出现了各种专用的带电测试仪器,使状态监测技术从传统的模拟量测试走向数字化测试。同时还出现一些其他通过非电量测量来反映设备状况的测试仪器,如远红外装置、超声检测装置等。20世纪90年代至今,发展到以数字波形采集和处理技术为核心的微机多功能在线监测系统,可实现更多的参数的连续实时和自动监测,其监测内容丰富、信息量大、处理速度快。

变压器的状态监测是国际上电力系统状态监测领域研究最多的对象之一,并且已经有很长的历史了。但分接开关起步晚,状态监测刚处于初步阶段。

变压器状态监测之所以受到电力部门管理、科研、运营和工程维护人员的日益重视并成为国际性的前沿研究课题,在于变压器状态监测具有以下主要优点。

(1) 可极大地减少计划的停电时间,提高电力系统运行的可靠性,改善对用户的服务。

(2) 因变压器的初期故障可以及时发现并及时采取措施,因而设备的损坏可降低到最小程度。

(3) 初期故障的排除,也可有效地减少其他相关设备的损坏和维护的时间。

(4) 实现基于状态的维护,从而延长变压器的维护间隔和使用寿命,缩短维护时间,减少维护费用。

(5) 状态监测提供的信息为电力部门的策略规划和有计划的停电提供了基础, 并为提高设备的使用率和可用率创造了条件。

(6) 只要被监测变压器的关键参数具有足够的安全裕度, 可增加其负载而不必增加新的变压器。

变压器的状态监测系统和常规的监控与数据采集系统 (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA), 或变压器保护系统有不同的作用与功能。SCADA 系统为变压器操作和维护人员提供了更多的实时数据。常规的 SCADA 系统和仪器用来采集和传送操作信息和控制命令, 其主要功能是提供系统负载信息、报警和控制, 但仅采集极有限的变压器信息。高成本、低数据量等缺点, 严重限制了这些 SCADA 系统能够监测的变压器参数数目, 因此, 这些系统对降低变压器维护成本无多大作用。

变压器继电保护系统虽然能在变压器出现故障时提供有效的保护, 但几乎不提供变压器的状态信息以及变压器初期故障和故障发展趋势的信息, 因而也达不到降低变压器维护费用的目的。

因此, 为了达到对变压器和分接开关状态的监测, 有效降低维护成本, 变压器的状态监测就得到了广泛的重视和研究, 尤其是微机技术、传感器技术、智能技术的发展, 使变压器的状态监测技术提高到了一个新的水平。

国内电气设备开展状态监测的状况很不平衡, 据对 31 个电力部门的状态监测的调查 (见表 0-1), 对金属氧化物避雷器实施全电流监测的最多 (13754 台), 且运行不正常的极少; 其次是监测电容型设备的电容量 C 及介质损失角正切 $\tan\delta$, 有 1827 套; 对变压器监测油中溶解气体有 234 套; 而对断路器或分接开关已实施在线监测的很少。

表 0-1

31 个供电公司在线监测设备运行情况的综合分析

项 目		监测电容型设备的 介损及电容 (或可兼 用于 MOA 的监测)		专用于监测金属 氧化物避雷器 (MOA)		监测油中溶解气体		监测断路器特性		监测 变压器 分接开 关特性
		固定式	便携式	仅全电流	全电流及 阻性电流	仅 H_2 、 CO 读数	监测各组 分含量	油断路器	SF_6 断路器	
运行正常	国产	764	717	13692	26	35	10	6	6	0
	进口	2	0	17	0	128	17	0	0	4
运行不正常	国产	8	8	32	0	6	3	4	7	0
	进口	41	0	0	0	3	2	0	0	0
已退出 或报废	国产	285	2	13	99	18	1	0	0	0
	进口	0	0	0	0	11	0	0	0	0
总 计	国产	1057	727	13737	125	59	14	10	13	0
	进口	43	0	17	0	142	19	0	0	4

变压器和分接开关状态监测的一个重要发展方向, 就是监测技术的集成化、自动化和智能化。集成化, 这意味着在同一套监测系统中, 多种监测技术有机结合, 互相弥补不足, 使得监测范围更广泛、分析结果更可靠, 并容易与其他系统, 如 SCADA 系统、继电保护系统、变电所综合自动化系统等集成或联网。自动化则意味着数据的采集和分析更实时、更少人工干预, 计算机技术、传感器技术、通信技术、分析技术 (如小波变换) 等相关技术的

发展,必将促进自动化水平的提高。而智能技术的发展,如神经网络、模糊逻辑、专家系统等,则将在变压器状态监测中得到更多的应用,从而促进监测技术的智能化。

3 状态诊断

状态诊断是一门新兴的学科。顾名思义,“诊”就是广泛地采集电气设备的信息,“断”才是对各种信息综合分析之后下的结论。

要实现状态诊断必须采用有效的状态诊断技术。状态诊断技术包括三个基本环节和四项基本技术。

状态诊断技术的三个基本环节如下:

- (1) 状态监测,即检查和发现异常状况。
- (2) 诊断故障状态和部位,分析故障类型。
- (3) 故障预测,对已识别出来的故障进行预测,预测故障的发展态势。

状态诊断技术的四项基本技术如下。

(1) 检测采集技术。检测采集技术就是准确地采集和测量反映分接开关状态的各种信号和参数的技术。分接开关在运行过程中必然会有振动、力、热及能量等各种量的变化,由此会产生各种不同的信息。根据不同的诊断需要,选择能表征分接开关工作状态的不同信号,如振动、压力、温度等是十分必要的。这些信号一般是用不同的传感器来获取的。

(2) 信号处理技术。信号处理技术将现场采集的各种信号,进行分类处理、加工和各种变换,把真正反映分接开关状态信息提取出来,即获得能表征设备特征的信息的过程(也称特征提取过程),如对振动信号从时域变换到频域进行频谱分析即是这个过程。

(3) 识别技术。识别技术是根据掌握的故障征兆信息和状态参数,将经过信号处理后获得的分接开关特征参数与规定的允许参数或判别参数进行比较、对比以确定设备所处的状态,判断是否存在故障及故障的类型和性质等的技术。为此应正确制定相应的判别准则和诊断策略。

(4) 诊断预测技术。根据对分接开关状态的判断,决定应采取的对策和措施,同时根据当前信号预测状态可能发展的趋势,进行趋势预测分析。

状态诊断方法可概括为比较法和综合法。比较法包括的内容有:①与设备历年(次)试验结果相互比较;②与同类型设备试验结果相互比较;③同一设备各相间的试验结果相互比较;④与《电力设备预防性试验规程》DL/T 596—1996规定的“允许值”(或“注意值”)相互比较。综合法就是不同试验项目结果的综合。

诊断技术结合人工智能的发展得到了更为迅猛的发展。目前这方面的研究主要沿着三个方向展开。第一是建立各类专家系统,人们对基于知识的故障诊断系统已经进行了大量的研究,然而随着研究的深入,人们发现目前专家系统仍面临许多困难,其中较为严重的问题是:缺乏有效的诊断知识表达、不确定性的知识推理以及诊断知识获取困难等。第二是建立人工神经网络(ANN),ANN基本理论是近年来重新兴起的一种人工智能方法,它为克服专家系统的缺陷开辟了一条崭新的途径。它的自学习功能、并行处理能力倍受大家的青睐,它的分布式存储能力若在状态诊断中用作知识的分布式存储,可能解决知识组合爆炸问题;其大规模并行处理能力可用于提高推理的速度,因而更适合于结构复杂、故障机理不十分明

显的复杂设备的诊断。第三是引用模糊数学推理的理论进行状态诊断，变电设备中常有一种故障存在多种表现或多种故障具有同一表现的现象，这样易引起误诊断的问题。为此，要引用模糊数学的基本理论，发展了模糊推理理论，并将它应用于变电设备状态诊断的研究。模糊数学作为一种处理不精确信息的工具在变电设备的故障诊断中可发挥着重要作用。目前如何确定符合国内变电设备状况和特点的隶属函数仍是一个需要解决的问题。

上述状态诊断内容可用图 0-1 来表示。

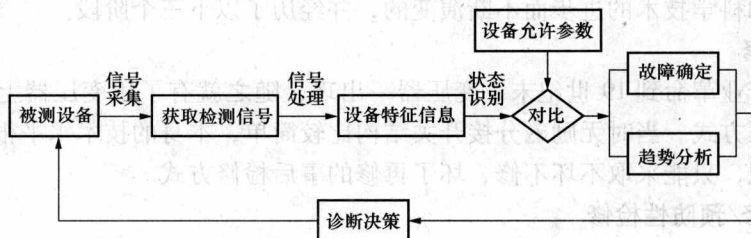


图 0-1 分接开关状态诊断过程图

4 运行状态分类

根据运行中分接开关的状态监测信息：在线监测的特征量、《电力设备预防性试验规程》DL/T 596—1996 试验的结果数据、分接开关历史运行状况和检修情况和现在运行参数状况等，综合地进行状态信息分析和状态诊断，全面客观地进行运行状态评估。

分接开关运行状态分为良好状态、正常状态、异常状态和危险状态四大类。

良好状态的分接开关是指运行中状态监测的数据都在合格的范围内，其主要性能数据优于合格的范围，其质量状态符合分接开关质量分等标准的优等品或一等品的要求。处于良好状态的分接开关，可以继续运行。

正常状态的分接开关是指运行中状态监测的数据都在合格的范围内或个别数据超标但数值稳定、运行正常的分接开关。处于正常状态的分接开关，也可以继续运行。

异常状态的分接开关是指运行中状态监测的数据证实分接开关有故障、并已确定故障的原因或部位，但判断短期内不会引发事故。例如分接开关在某些分接位置运行有过热现象，但在其他分接位置仍可运行；或者分接开关油室出现渗漏油，短期内不会引发事故，可以在下一次预防性小修时处理。处于异常状态的分接开关，要密切跟踪故障的发展动态。必要时，要限期停电检修。

危险状态的分接开关是指运行中状态监测的数据判断表明随时都会发生事故。例如分接开关油流控制继电器动作或油室爆破膜（盖）爆裂喷油；触头严重接触不良，DGA 气体分析三比值法判断为高温过热等状态，必须紧急停运检修。

5 状态检修

状态检修（CBM）是针对传统的电气设备进行定期的计划检修（TBM）存在的各种弊端，而提出的一种全新的检修概念。

计划检修是按照《电力设备预防性试验规程》DL/T 596—1996 所规定的试验周期，到期必修，而不顾电气设备运行状态，具有很大的盲目性和强制性。因而造成设备的被迫停电