

变电设备状态巡维 研究与应用

东莞供电局变电管理一所 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

变电设备状态巡维 研究与应用

东莞供电局变电管理一所 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

巡视与维护是变电运行管理的重要日常工作之一,传统的变电设备巡视检查往往偏重正常巡视,而忽视了与设备的健康状态及运行工况相结合。在电网设备规模大幅增长、电网结构性风险长期存在等种种因素的影响下,如继续沿用传统的巡视模式,现有的巡维资源无法满足,同时亦会带来巡视质量下降和安全风险增加等不利影响。为了缓解电网设备运行维护的压力,提升现场变电设备巡维效率,有必要及早开展设备差异化巡视与维护工作的研究。

全书共4章,内容包含设备状态检修技术发展概况、设备状态评价及风险评估方法、变电站巡视与维护管理、基于风险的差异化巡视与维护管理。本书将现有的设备状态评价及风险评估技术与精益化管理理念等相结合,给设备运维人员提供一个新的工作视角来组织设备状态评价、风险评估,进行设备分级,安排巡维作业,具有较强的实用性。

本书可供从事变电设备运维的技术人员和管理人员使用,也可供变电运维相关专业人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变电设备状态巡维研究与应用/东莞供电局变电管理一所
组编. —北京:中国电力出版社, 2015.3

ISBN 978-7-5123-7117-0

I. ①变… II. ①东… III. ①变电所—电气设备—维修
IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 014808 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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 3 月第一版 2015 年 3 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 10 印张 133 千字

定价 30.00 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

编 委 会

主 编 王永源

副 主 编 张汉光 陈寿平 吴 俊 孙德兴

编写人员 黄杰明 姚俊钦 黄国尊 蔡仲宁

蔡 勇 黎才添 张 刚 李应光

陈志明 萧仲豪 刘纪堂 刘海涛

周鹏威 卢润波 吴小彪

合作单位 深圳市海联讯管理咨询有限公司

近年来,我国经济高速发展,带动了用电需求的大幅增加。同时对供电可靠性的要求也越来越高,这就给变电设备运行维护与管理造成了空前的压力,运行人员紧缺的问题也逐步凸显。在这个大环境下,供电企业运行人员开始寻求检修资源优化配置的方法,如何加强设备管理、提高运行效率和降低巡视与维护成本,如何有效降低设备缺陷率、故障和跳闸次数,从而达到最优的经济效益,成为供电企业运行人员越来越关注的问题,变电设备差异化巡视与维护的概念也应运而生。

巡视与维护(以下简称巡维)是变电运行管理的重要日常工作之一,通过巡视和维护可以掌握变电设备的运行状况,发现运行中的异常并及时采取措施排除隐患,对于提高变电设备的可靠性以及保证电网安全稳定运行具有重要意义。

传统的变电设备巡视检查往往偏重正常巡视,而忽视了设备的健康状态及运行工况。当前,对 35kV 及以上变电站巡视工作主要采取定期巡视方式,同时,在用电高峰、外部环境恶劣等条件的影响下,采取特殊巡视以加强巡视的密度,这种定期巡视加特殊巡视的方式构成了传统的设备巡视方法,这种方法主要依靠变电设备在运行中由巡视人员定期进行巡视和维护,凭外观现象、指示仪表等进行判断,发现可能的异常并及时处理,避免事故发生。传统巡视方法的特点是定人、定点、定期地对设备进行检查,它更注重的是巡视位置和固定周期,与设备状态无关,而且这种巡视周期的制定大多是凭经验制定的,缺乏一定的科学性,如果巡视周期过长,不能及时发现设备的缺陷,容易造成设备故障频发,从而严重影响电网安全运行;反之,如果巡视周期过短,又会造成人力、物力的浪费。同时,过度巡视容易造成运行人员思想上的麻痹大意,对设备状况反应的灵敏度下降。

在电网设备规模大幅增长、电网结构性风险长期存在、外部环境多变、交通成本不断上升等种种因素的影响下,如继续沿用“正常巡视+特殊巡视”的传

统管理模式，现有的巡视维护资源无法满足要求，同时亦会带来巡视质量下降和安全风险增加等不利影响。

为了缓解电网设备运行维护的压力，有效利用现有人力、物力，提升现场变电设备的巡维效率，确保电网、设备稳定运行，有必要及早开展设备差异化巡维工作的研究，从而提升巡维工作的质量和效率。

差异化巡维是指基于电网风险、设备价值和健康状态的差异，利用有限的人力、物力和时间资源，借助设备分级、巡维标准等一系列管理手段，有效提升现场变电设备巡维工作的效率，确保电网设备的稳定运行。差异化巡维能够在一定程度上解决传统设备巡视方法带来的负面影响。

差异化巡维的核心是风险，通过将风险引入状态检修技术中，较好地衡量设备自身状态及设备故障带来的影响，为制定准确的差异化巡维策略打下基础。风险评估技术的准确性决定差异化巡维的可靠性。本书提出了一种改良的基于风险的状态检修技术（Risk Based Maintenance, RBM），在这个基础上，建立了较为完善的差异化巡维管理体系。本书将现有的设备状态评价及风险评估技术与精益化管理理念等相结合，给设备运维人员提供一个新的工作视角来组织设备状态评价、风险评估、设备分级、巡维作业，是对现有的设备巡视与维护管理体系的有益补充。

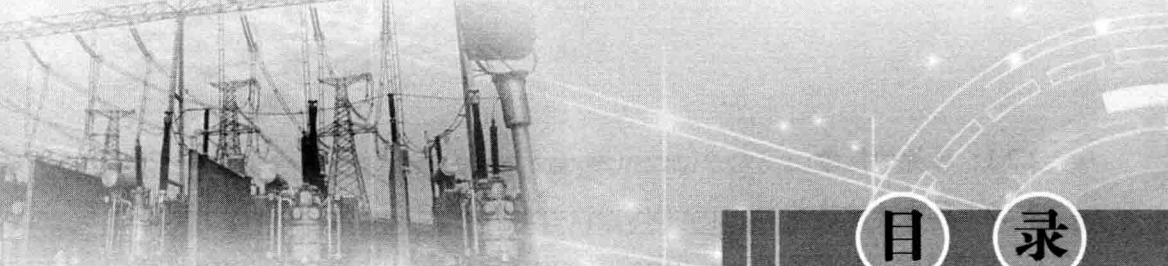
全书共4章，第1章简要介绍设备状态检修技术的发展概况。第2章作为本书重点，着重介绍变电设备状态评价及风险评估方法，创新性的提出设备健康风险模型，并首次全局性和前瞻性的提出区域设备健康风险指数的概念，对巡维管理的安排和资源调配具有重大指导作用；从单个设备的健康模型到变电站设备健康风险指数、区域设备健康风险指数，从单个设备的管理到设备组的管理，是未来设备管理的发展方向。第3章对变电站管理和运行管理的现状进行简单描述，同时对目前变电站运行管理中精益化管理的情况做了介绍。第4章在前两章的基础上，完整地提出了差异化巡维管理体系的理论和具体工作方法指引。

本书在编写过程中得到了深圳市海联讯管理咨询有限公司的支持和协助，特此表示感谢。

限于作者水平，本书中如有不妥之处，敬请读者谅解指正。

编 者

2013年12月



目 录

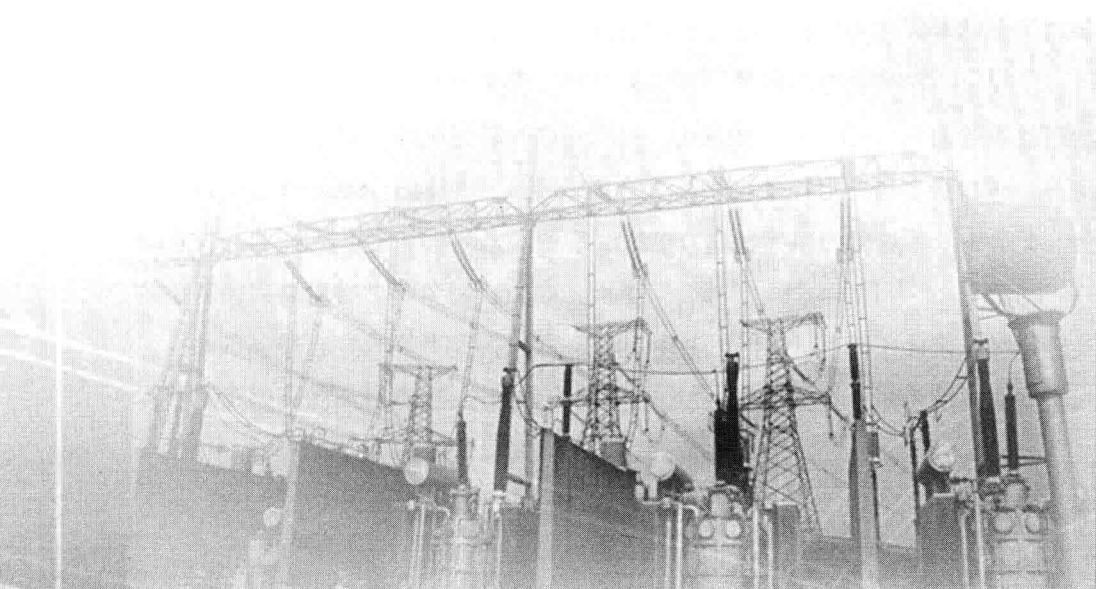
前言

1 设备状态检修技术发展概况	1
1.1 设备维护方式的发展	3
1.2 状态检修技术	7
1.2.1 概述	7
1.2.2 国外设备状态检修应用研究现状	11
1.2.3 国内设备状态检修应用研究现状	12
1.2.4 状态检修存在的问题分析	13
1.3 基于风险的设备状态检修技术	14
1.3.1 国外 RBM 技术的应用研究现状	15
1.3.2 国内 RBM 技术的应用研究现状	17
1.3.3 RBM 中风险评估技术存在的问题分析	19
2 设备状态评价及风险评估方法	21
2.1 设备状态评价方法	23
2.1.1 设备状态量	23
2.1.2 状态评价方法	25
2.1.3 变压器的状态评价	26
2.2 设备状态风险评估方法	27

2.2.1	风险的概念	28
2.2.2	风险评估技术	29
2.3	健康风险评估方法	35
2.3.1	设备健康风险值评估流程	36
2.3.2	健康度的确定	36
2.3.3	重要度的确定	39
2.3.4	管控级别的确定	40
2.3.5	设备健康风险值的计算	41
2.3.6	变电站健康风险指数的计算	51
2.3.7	区域设备健康风险指数	54
3	变电站巡视与维护管理	57
3.1	变电站管理	60
3.1.1	变电站基础管理	60
3.1.2	变电站设备管理	62
3.2	变电站运行管理	65
3.2.1	变电站运行管理模式	65
3.2.2	变电站巡视的要求及模式	70
3.2.3	现行的变电站设备巡视周期模式	73
3.2.4	设备巡视技术研究	74
3.2.5	现行的设备巡视管理和监督模式	79
3.2.6	设备巡视与维护管理存在的问题分析	80
3.3	变电站精益化管理	82
3.3.1	设备精益化管理	82
3.3.2	运行精益化管理	83

4 基于风险的差异化巡视与维护管理	87
4.1 建立基于风险的差异化巡视与维护管理体系	89
4.1.1 基于风险的设备状态评价工作的开展	89
4.1.2 基于风险的设备分级	90
4.1.3 基于风险的差异化巡维策略的制定	91
4.1.4 差异化巡视与维护责任管理体系的建立	93
4.2 差异化巡视与维护工作指引	95
4.2.1 岗位流程对应一览表	95
4.2.2 差异化巡视与维护工作的定义	96
4.2.3 变电站差异化巡维流程图	97
4.2.4 变电站差异化巡维工作内容	98
4.2.5 流程节点业务表单	101
附录	106
附录 1: 变压器状态评价及风险评估工作表	106
附录 2: 主变压器差异化巡视记录表	108
附录 3: 变电设备状态评价与风险评估月度总结	110
附录 4: 变电站维护策略表	115
附录 5: 变电站季节性巡视策略表	118
附录 6: 35~500kV 油浸式电力变压器(含高抗)巡维策略表	121
参考文献	147

设备状态检修技术 发 展 概 况



设备维护有三种方式：故障检修、预防性维护和预测性维护。当前，预防性维护（Preventive maintenance）在设备维护中占据了主导地位，常见的设备的点检、保养、润滑、定期检修（大、中、小修）等就属于预防性维护。但是，预防性维护也有其局限性，例如针对性不强，容易出现对状态较好的设备过度维护、对状态较差的设备维护不足等问题，因此，预测性维护（Predictive maintenance）得到了越来越多的运用。

预测性维护是通过预测设备的故障模式，并对故障模式的数据进行分析，判断设备的状态，从而实施精确维护的一种方式，具有较强的针对性。显然，它能有效避免设备维护的过度与不足的问题，使设备维护资源的效益最大化。实施设备预测性维护的关键，是如何确定设备的故障模式、确定能表征设备故障的数据并对数据进行监测、确定数据与设备状态之间的关联。这都需要设备维护技术的支持。

设备状态检修（Condition Based Maintenance）是近些年发展起来的一种先进的预测性维护方式，它包含了针对设备的检测、诊断、检修决策等技术内容，涉及传感器、计算机、人工智能等先进的技术手段。

1.1 设备维护方式的发展

设备维护方式随着经济的发展、科技的进步而不断演变，大体经历了故障检修、预防性维护和预测性维护三种方式。下面简要地进行介绍。

（1）故障检修。故障检修（Corrective Maintenance，CM），也称事后检修（Break Maintenance，BM），它是在设备发生故障后才对设备进行维修的一种检修方式。18 世纪下半叶第一次工业革命发生，机器大生产代替了手工作业，设备检修的需求促使故障检修方式应运而生。

故障检修方式具有严重的缺陷：无计划地打断生产，不利于大生产的组织；需要花费较高的维修费用，造成较大的生产损失；严重威胁着设备和人身安全。

(2) 预防性维护。预防性维护 (Prevention Maintenance, PM) 是一种为防止设备发生故障而进行的设备维护活动, 例如设备点检、保养、润滑和清扫, 以及定期的设备大、中、小修就属于预防性的设备维护, 它是在第二次工业革命时期开始推行的。

按照检修的技术条件、目标的不同, 预防性维护中的检修可分为以下几种:

1) 定期检修 (Time Based Maintenance, TBM)。TBM 是在第二次世界大战以后, 从军事工业移植到民用工业的一种检修制度, 我国电力工业的 TBM 制度是 20 世纪 50 年代从苏联引入。TBM 在保证重大机械设备正常工作中起到了防止或延迟故障的作用, 但 TBM 并没有根据设备的实际状况制定检修策略, 而是单纯的按规定的時間间隔对设备进行相当程度解体的维修工作, 这种检修制度不可避免地产生了“过剩维修”的弊端, 造成了设备有效利用时间的损失和人力、物力、财力的浪费, 甚至还有可能会造成维修故障。据统计, 1996 年我国的 100MW、125MW、200MW 火电机组非计划停运与出力降低的原因, 分别有 36%、31% 和 41% 是由于“过剩维修”造成的^[3]。

2) 故障查找 (Fault Find, FF)。这种维修方式主要针对紧急备用设备, 在固定的时间后启动这些设备, 发现问题及时解决, 以提高备用设备的可用率。

3) 以可靠性为中心的检修 (Reliability Centered Maintenance RCM)。RCM 是以最小的资源投入保持设备可靠性和安全性为原则, 采用必要的技术手段和分析判断方法来确定设备预防性维修要求的过程或方法, 它强调以设备可靠性、设备的故障后果作为制定维修策略的主要依据。RCM 技术在 20 世纪 60 年代末起源于美国航空界, 于 1984 年由美国电力研究院 (The Electric Power Research Institute, EPRI) 将其应用于核电厂的检修。EPRI 维修诊断中心利用各种先进的测量技术和分析软件在线监测和故障分析电站、电网的设备, 据此制订设备的维护和检修计划。其经验表明, RCM 可将设备的大修周期从 3~5 年延长到 6~8 年甚至 10 年, 节省了大量的检修费用, 延长设备使用寿命, 同时减少了

设备停电时间,提高供电效率 50%以上^[4]。到 1997 年,在美国排名前 1000 的大公司中,已有 68%的公司选择采用 RCM 检修方法。

(3) 预测性维护。前文讲到,预测性维护是通过预测设备的故障模式,并对故障模式的数据进行监测和分析,判断设备的劣化状况,从而实施有针对性的维护/检修的一种方式。

1) 设备状态检修。状态检修(Condition Based Maintenance, CBM)是预测性维护的主要形式,故有时也把它称作预测性维护。状态检修的工作过程是:通过对设备的工作状况进行监测以获得设备的状态数据,分析这些数据以确定设备的故障趋势(故障的早期征兆),运用设备的寿命特性以判断设备故障的部位和时间,从而确定最佳的设备维修方案和时机。实施设备状态检修必须具备的条件,首先是设备状态能被监测,即必须具备先进的设备制造技术,其次是要有设备状态监测技术和故障诊断技术。

状态检修是 1970 年由美国杜邦公司 I. D. Quinn 率先提出的,国外从 20 世纪 80 年代初开始了较为深入的技术研究,开发了许多在线监测和故障诊断设备,同时在理论研究方面也取得了较大进展。在技术成果的应用上,国际大型电力企业从 20 世纪 70 年代就开始了状态检修的应用,美国电力研究院及其检测诊断中心、美国 CSI 公司、ENTEK-IRD 公司以及美国、加拿大的一些仪器公司在发输电企业的应用也取得了一定的成果。出于成本和技术等原因,我国电力企业大量采用在线监测和故障诊断设备尚有一定难度,如何充分利用国内现有资源,加强基础数据分析,提高诊断分析的科学水平是当前开展变电设备状态检修的首要问题和必由之路。

状态检修与预防性检修相比,除了具有预防性维护的优点外,还具有明显的优越性,它可以适时地进行必要的检修,有效避免过度维护或者维护不足,保证设备安全和人身安全;有效避免设备运行的非计划性中断,降低设备维护费用,保证维护资源效益的最大化。在电力行业,状态检修的优点可归总为以下几点:①及时发现和排除电力系统故障隐患,提高供电可靠性;②减少电力

系统停电检修的盲目性和损害性,降低供电成本,实现资源优化配置;③ 准确反映输变电设备的使用寿命、安全指标,保证系统始终处于可控状态。

不过,由于状态检修需要监测的内容多,投资大,并存在一定的风险,要能熟练地运用于设备维修还需要长时间的经验和技術积累。状态检修也还存在一些尚待解决的问题,例如,如何提高设备状态评价的准确性,如何优化设备状态评价标准,如何根据评价标准制订适用的检修策略。于是,在状态检修的基础上衍生出基于风险的设备状态检修技术(Risk Based Maintenance, RBM)。

2) 以寿命评估为基础的检修。大多数工业化国家的电力基础设施在 20 世纪 60~70 年代间得到了极大扩充,多数电力主设备在役时间达到 20 年以上,进入老化阶段的设备愈来愈多,迫使电力公司研究如何延长设备寿命并保证效益。以寿命评估为基础的检修,就是状态检修中应用寿命预测与评估技术先估计设备寿命,再确定检修项目、频度与检修内容,这样有利于科学合理地安排检修和提高设备的可用率。

3) 基于风险的设备检修。基于风险的设备检修技术(RBM)的研究最早源于石化行业,其原理在于概率性事件发生后对单一设备以及系统的影响,从设备风险的角度出发制定合理的检修策略。电网的运行对设备的可靠性,特别是对供电连续性要求较高,而单一设备发生故障后的影响不仅仅局限于设备自身,可能会扩大至区域电网甚至全系统,从而产生严重的后果。因此,检修策略中仅考虑设备自身的影响而忽略了设备故障对系统的影响是缺乏科学性的,也不能满足电网安全运行的要求。RBM 的特点是充分考虑了设备在系统中的重要程度、故障概率和故障后果大小的差异,通过建立完善的风险指标对设备状态进行评估。由于风险指标兼顾了安全性和经济性,将风险指标引入状态检修技术可以更好地衡量设备自身健康状态,并实现对设备故障带来影响的预测,因此,RBM 是一种在状态检修的基础上发展起来的,更为全面合理的检修技术。下文通过研究国内外的设备状态检修技术,分析了现阶段检修技术存在的问题和可

以改良的地方。

1.2 状态检修技术

1.2.1 概述

实施状态检修，除了设备本身应具有状态可监测的先进性外，还需要设备状态监测技术和故障诊断技术的支持。由于状态检修所具有的优越性和它可带来的显著的效益，与它相关的理论和技术研究以及生产实践都得到广泛而深入的展开，取得了丰硕的成果。这方面的技术主要有：设备寿命管理与预测技术、设备可靠性分析技术、设备状态监测与故障诊断技术和信息管理与决策技术。下面介绍这四个技术在电力系统的技术成果。

(1) 设备寿命管理与预测技术。状态检修首先被应用在电力系统并得到发展，在状态检修中运用寿命预测与评估技术，能够合理地安排设备检修，提高设备的利用率。电力企业获得效益的关键在于电力主设备的可用时间，因此，各国都把寿命预测和评估研究的重点放在对锅炉、汽轮机、发电机、变压器及高压开关等重要电力设备上。

1) 汽轮机—发电机方面。对汽轮机—发电机实施状态检修，重点考虑汽轮机轴瓦、叶片，发电机定子、转子、轴系等部件。美国电力研究院监测诊断中心研制出用于汽轮机诊断的叶片寿命动态分析系统 (Blade Life Analysis and Design Evaluation, BLADE) 和用于发电机诊断的转子裂纹评价系统 (Stress and Fracture Evaluation of Rotors, SAFER)，运用这个系统，可以推测叶片何处可能出现裂纹、产生裂纹后的寿命，从而帮助工程技术人员评估汽轮机、发电机转子的剩余寿命及随运行时间的故障发生概率。日本电力工业中央研究院对这个系统进行了改进，使之功能更全面，评定准确度更高^[5]。华中科技大学也提出了汽轮机转子在线寿命管理系统框架，并研制了 200MW 汽轮发电机寿命管理

及故障诊断专家系统。国家能源局 2009 年发布了《DL/T 654—2009 火电机组寿命评估技术导则》行业标准，其中有汽轮机高、中压转子的疲劳寿命评估的方法。可见，国内已经有了比较成熟的转子寿命评估的理论和方法。

对于汽轮发电机的定子，俄罗斯科技工作者在总结了俄罗斯 11 个不同电厂经验的基础上，制订了延长汽轮发电机定子使用寿命的主要原则和依据。罗马尼亚则成功研制了一套用于 75MVA 汽轮发电机监视诊断、数据记录及在线监测的系统，其中在线监测部分，主要用于对定子绕组绝缘剩余寿命和轴系剩余寿命的评估。

在轴系方面，我国的寿命预测与评估技术有一定成果。上海交通大学电力学院采用自己开发的 MAN-DISP 程序，对电气扰动下电力系统的暂态过程进行仿真并得出轴系的动态扭转力矩，成功地评价了电网扰动对 300MW 汽轮发电机组轴系疲劳寿命的影响。华北电力大学也对国产运行近 30 年的 50MW 汽轮机一发电机进行了扭振特性及其疲劳寿命研究，采用了集中参数的机组轴系扭振分析模型，以现场事故情况为依据，模拟计算了几种典型事故大轴联轴结处轴颈和螺栓的应力应变历程及疲劳寿命损耗，对该机组的剩余寿命能够较恰当地进行评估。

2) 变压器方面。变压器剩余寿命的评估是当今变压器状态监测与诊断工作的重要内容之一。变压器遭受到的短路次数、过电压次数、设计弱点、修理和现场运输等因素都会影响变压器发挥功能，要正确估算变压器的寿命，就必须获得变压器运行状况和历史信息，需要对变压器技术情况有更深入的了解。研究及实验表明，变压器退出运行的原因主要是经济寿命的限制，而很少是技术性能或使用寿命。因此，先前对变压器寿命的估计大多数仅简单考虑负荷、温度、绝缘材料的现状的方法存在不足，因而 ABB 公司和欧洲一些重要电力部门为避免对剩余寿命进行定量评估，开发了一种变压器排列等级方法，为变压器的寿命评估做了大量工作。

3) 开关方面。高压断路器在电力系统中担负着控制和保护的双重任务，关