



智能配电网技术丛书

# 配电设备 在线状态监测及评价

On-line Monitoring and Assessment  
for Distribution Equipments

胡志广 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



智能配电网技术丛书

# 配电设备 在线状态监测及评价

On-line Monitoring and Assessment  
for Distribution Equipments

胡志广 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书从配电网的电缆及隧道、开关柜、变压器、站所建筑物、数据传输、状态检修后台等方面，阐述了配电设备的在线监测技术和状态检修策略。第1章是综述，第2章是电缆及隧道在线监测及状态评价技术，第3章是开关柜在线监测及状态评价技术，第4章是配电变压器在线监测及状态评价技术，第5章是站所建筑物在线监测及状态评价技术，第6章是在线监测通信技术研究，第7章是状态检修后台处理技术研究，第8章是工程案例，第9章是结论与展望，本书最后还附有电缆线路状态量评价标准。

本书可作为检修工作人员的作业参考用书，也可供电气专业人员学习参考。

## 图书在版编目（CIP）数据

配电设备在线状态监测及评价 / 胡志广主编. —北京：中国电力出版社，2016.10

（智能配电网技术丛书）

ISBN 978-7-5123-8736-2

I. ①配… II. ①胡… III. ①配电装置—动态监测  
IV. ①TM642

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2016）第 004890 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>）

万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11.75 印张 202 千字

印数 0001—1000 册 定价 49.00 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 胡志广

副主编 余南华 陈 辉 郑文杰

参 编 黄 曙 陈云瑞 张 玲 裴星宇

张晓平 李传健 李 瑞 周克林

崔江静 廖雁群 辛勇军 李冬丽

包金龙 郑亚茹 黄跃华 李 聪

梁家璇 刘谋君

## 前 言

目前,我国现行电力设备的检修模式是以故障检修和预防性计划检修为主的检修模式,这种检修模式同时存在检修频繁、检修费用高、盲目维修、检修过剩和检修不足等多重弊端,已不能适应市场经济条件下电力行业发展的要求。

1970年,美国杜邦公司 I.D.Quinn 首先提出了状态检修(Condition Based Maintenance, CBM)的检修模式。这种维修方式以设备当前的实际工作状况为依据,通过高科技状态监测手段,识别故障的早期征兆,对故障部位、故障严重程度及发展趋势做出判断,以确定各器件的最佳维修时机。随着传感技术、微电子、计算机软硬件和数字信号处理技术、人工神经网络、专家系统、模糊集理论等综合智能系统在状态监测及故障诊断中应用,使基于设备状态监测和先进诊断技术的状态检修研究得到发展。这种先进的检修模式已广泛应用于美国、法国等发达国家的电力系统的锅炉、发电机、变压器等大型电气设备的检修实践中。

1996年,我国电力系统开始状态检修模式试点工作,取得了一定的经验和成绩。实践证明基于设备运行状态的状态检修一方面可以延长设备检修间隔、提高设备可靠性;另一方面,可以推动电力设备管理体制的改革,它已成为电力系统设备管理发展的趋势。

截至2014年年底,关于状态检修的研究和试点工作主要集中在输变电领域,尤其在电压等级为110kV以上的变电站。配电设备(6~20kV)的状态检修在国内尚未得到重视,缺乏这方面的研究。但是,随着智能电网目标的提出和建设的深入,配电网的智能化已成必然之势。配电设备的在线监测及状态检修作为配电网智能化的重要内容已为行业所重视,相关的研究和试点必将快速展开并逐步深入。

本书从配电网的电缆及隧道、开关柜、变压器、站所建筑物、数据传输、状态检修后台等方面,阐述了配电设备的在线监测技术和状态检修策略。第1章是综述,第2章是电缆及隧道在线监测及状态评价技术,第3章是开关柜在线监测及状态评价技术,第4章是配电变压器在线监测及状态评价技术,第5章是站所

建筑物在线监测及状态评价技术，第6章是在线监测通信技术研究，第7章是状态检修后台处理技术研究，第8章是工程案例，第9章是结论与展望，本书最后还附有电缆线路状态量评价标准。

由于作者水平有限，书中疏漏与不妥之处敬请读者斧正，不胜感谢。

编 者

2015年5月

# 目 录

前言	
<b>第 1 章 综述</b> .....	1
1.1 设备检修方式.....	1
1.2 国内外状态检修发展现状.....	2
1.3 在线监测技术.....	3
1.4 在线监测与状态检修系统.....	4
<b>第 2 章 电缆及隧道在线监测及状态评价技术</b> .....	7
2.1 电缆温度在线监测技术.....	7
2.2 电缆故障定位技术.....	13
2.3 电力隧道环境综合在线监测技术.....	16
2.4 电力隧道井盖集中监控技术.....	18
2.5 电力隧道智能视频监控及入侵报警技术.....	20
2.6 电缆及隧道健康状态评价标准.....	22
<b>第 3 章 开关柜在线监测及状态评价技术</b> .....	25
3.1 概述.....	25
3.2 开关机械性能在线监测技术.....	26
3.3 开关柜内接点温度在线监测技术.....	35
3.4 开关绝缘性能在线监测技术.....	43
3.5 开关柜健康状态评价标准.....	60
<b>第 4 章 配电变压器在线监测及状态评价技术</b> .....	68
4.1 概述.....	68
4.2 套管介质损耗在线监测技术.....	69
4.3 油中气体在线监测技术.....	75

4.4	温度在线监测技术	79
4.5	油中微水在线监测技术	79
4.6	变压器防盗技术	85
4.7	变压器健康状态评价标准	85
<b>第5章</b>	<b>站所建筑物在线监测及状态评价技术</b>	<b>96</b>
5.1	站所建筑物温湿度在线监测技术	96
5.2	站所建筑物安全监测技术	99
5.3	站所建筑物环境对配电设备健康状态的影响	99
<b>第6章</b>	<b>在线监测通信技术研究</b>	<b>102</b>
6.1	概述	102
6.2	在线监测数据分类及应用要求	103
6.3	宽带无线接入技术	104
6.4	光纤通信	116
6.5	配电载波技术	122
6.6	不同通信技术的比较	125
6.7	应用建议	126
<b>第7章</b>	<b>状态检修后台处理技术研究</b>	<b>131</b>
7.1	功能概述	131
7.2	软硬件架构	134
7.3	与其他系统/模块的交互接口	138
7.4	数据处理流程	140
7.5	设备状态分析评价方法	140
7.6	智能预警预测技术(专家系统)	141
7.7	状态检修决策系统的人机交互	143
7.8	配电设备的全寿命周期管控技术	143
<b>第8章</b>	<b>工程案例</b>	<b>147</b>
8.1	珠海 220kV 琴莲线高压电缆局部放电在线监测工程	147
8.2	珠海横琴岛配网在线监测示范工程	152
<b>第9章</b>	<b>结论与展望</b>	<b>159</b>
9.1	在线监测及状态检修技术总结	159



9.2 目前存在的主要问题 .....	161
9.3 在线监测及状态检修技术发展趋势 .....	162
附录 电缆线路状态量评价标准 .....	164
参考文献 .....	175

# 综 述

设备检修指通过一定的策略对设备进行检查、维护、维修，以预防故障的发生或对已发生的故障进行修正，保持设备正常、可靠运行。设备检修技术经历了漫长的发展，目前正向以计算机及信息技术为核心的状态检修技术发展。本章将对设备状态检修方式的技术演变进行概述，并对国内外状态检修的发展状况与趋势进行探讨。

## 1.1 设备检修方式

随着科学技术的不断进步，设备检修方式在不断演变。第一次产业革命时期，事后检修/故障检修（Break Maintenance, BM）占据主导位置，这种检修方式只能进行事后补救，不能预防故障的发生；19 世纪第二次产业革命以电力设备的广泛应用为代表，此时出现了预防性检修（Prevention Maintenance, PM），预防性检修的目的是争取在故障发生前消除故障隐患。研究人员对预防性检修进行了不断完善，根据检修的技术条件、目标的不同开发出不同的检修方式：以时间为依据，预先设定检修工作内容和检修周期的定期检修策略（Time Based Maintenance, TBM），也称计划检修（Schedule Maintenance, SM）；以可靠性为中心的检修策略（Reliability Centered Maintenance, RCM），RCM 是一种以用最低的代价来实现机械设备固有可靠性水平为目标的检修方式。

随着信息技术的飞速发展，1970 年，美国杜邦公司首先提出了状态检修概念（Condition Based Maintenance, CBM），或称预诊性检修（Predictive Diagnostic Maintenance, PDM）。这种检修方式依托计算机技术与先进的通信技术，以设备当前的工作状况为依据，通过状态监测手段获取工作状态参数，并利用先进的评价算法诊断设备健康状况，从而确定设备是否需要检修或确定检修的最佳时机。

CBM 是一种先进的检修方式，目标是减少设备停运时间，提高设备可靠性和可用系数、延长设备寿命、降低检修维护费用、改善设备运行性能；从而提高经济效益。TBM、RCM、CBM 三者本质上都属于预防性检修，并没有明显的界限，定期检修中含有部分状态检修的因素，状态检修由定期检修发展而来，二者均以提高可靠性为前提和目标的。

如图 1-1 所示列出了设备检修方式的演变过程。这几种检修策略经历了从事后补救到事前预防的过程，随着科学技术的不断进步，尤其是信息技术、传感技术、人工智能技术等突飞猛进，实施状态检修的技术条件日趋成熟，也是配电自动化进程必然的发展趋势。

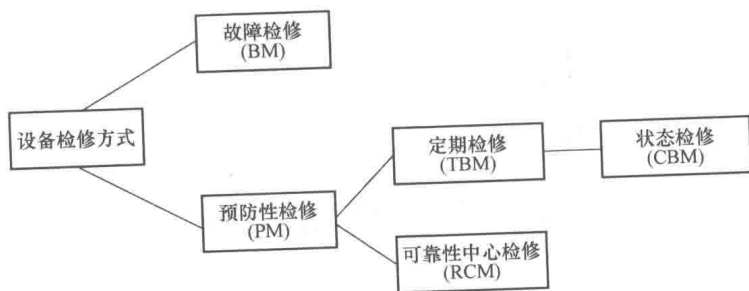


图 1-1 设备检修方式的演变过程

## 1.2 国内外状态检修发展现状

### 1.2.1 国内状态检修发展现状

国内电力系统于 20 世纪 90 年代初率先对状态检修进行试点，经过十几年的试运行，各供电企业进行了各具特色的探索，总结出一系列经验成果。

南方电网广州供电局有限公司通过总结多年设备检修的经验和教训，从 20 世纪 90 年代开始以检修工作量最大的断路器（当时主要针对少油断路器）作为状态检修的起点，先后制定了《高压开关检修周期及开断短路电流统计方法的规定》《变压器状态大修的规定》《高压开关性能状态判断及检修规定》等规范规定。为状态检修的发展做出了开拓性贡献。

大连市供电公司对近 100km 的 660kV 架空输电线路进行了连续十年的自然积污试验，统计出绝缘子外绝缘外附盐密雨季期间降至最低，且接近于零；盐密在年度之间无累计效应。得出结论：就线路外绝缘强度而言，调爬与清扫相比更

具有绝对的重要性。

山东、浙江省电力公司对变压器、断路器都制定了状态检修导则。用来指导基层供电局开展状态检修工作。

近几年,我国在电力设备在线监测装置研制方面也取得了很大进步。实际应用比较成熟的包括油色谱在线监测仪、局放红外热成像仪、避雷器在线监测仪、故障录波器等。随着计算机网络技术、因特网技术的普及和发展以及电力系统的不断改革,我国的供电设备状态管理和状态检修得到快速发展,一些实力雄厚的高科技企业与科研单位相继投入这个领域的研发工作,开始了一系列管理软件和检修系统。其中,西安中洲电力设备有限公司、宁波理工监测设备有限公司、东方电子、浙大快威等都拥有颇具竞争力的产品。

值得注意的是,国内目前的状态检修研究主要集中于发输变环节,配电设备的在线监测与状态检修技术仍处在起步阶段。这个领域具有广泛的市场前景与社会经济效益,各大厂商正逐步重视这一环节,未来几年,配电设备在线监测与状态检修将会迎来一个快速发展的时期。

### 1.2.2 国外状态检修发展现状

欧洲大多数国家也正在向状态检修机制过度。到目前为止,基于计算机网络技术的设备管理、故障分析及预警系统在美国、加拿大等国已普遍应用,且已发展了多个版本,如 Integrated Maintenance System 等。这些软件系统应用局域网、因特网及地理信息系统(Geographic Information System, GIS)等最新的计算机与信息处理技术,将状态管理、故障预警和故障处理进行系统级的集成,大大改善了其设备监管环境,提高了监管效率。

## 1.3 在线监测技术

通过装在生产线和设备上的各类监测仪表,对生产及设备状况进行连续自动检测,称在线监测,在线监测是状态检修的一个重要基础。

应用在线监测技术时,要全面考虑其有效性、可靠性、经济性等各方面,分析采用后的可靠性增益与经济效益。在线监测包括两个重要组成部分:①监测终端,即实施监测设备;②数据上传设备,即在线通信部分。监测设备采用的技术来源不一,一般采用各式传感器技术,包括基于电气方法、化学方法、物理方法、光学方法、声学方法、电磁方法等的感知技术,应根据不同的监测对象采用不同

的方式，并且应以准确性与效率为原则。数据传输部分伴随通信技术的发展而发展，主要的传输技术包括电缆、光缆、无线电台、微波通信等，并没有统一的标准，根据实际监测场合而定。

在线监测也存在一些待解决的问题，具体如下：

(1) 投资较大。传感器与计算机技术的发展是在线监测技术发展的前提，目前该领域设备价格普遍较高，需要进一步采用新技术降低成本。

(2) 寿命不匹配。在线监测设备寿命一般较短，与电力设备几十年的使用寿命相比显得过短。

与在线监测技术的缺点相比，其正面意义更受关注。如新的在线监测技术能比停电测试更有效、更及时的发现设备故障与缺陷，能够防患于未然，减少停电时间、次数，减小劳动强度，提高工作效率。因此，在线监测技术越来越多的应用于电力、能源、水利等各领域，未来随着设备成本的降低，其应用将会更加普遍。

## 1.4 在线监测与状态检修系统

在线监测是状态检修必不可少的组成部分，两者共同组成一个完整的系统。从在线监测到状态检修要经过多个步骤，如图 1-2 所示为在线监测与状态检修系统结构示意图。

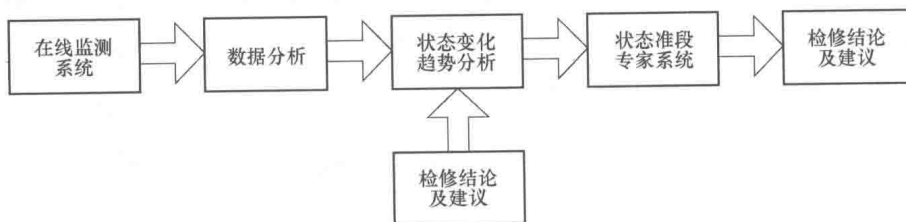


图 1-2 在线监测及状态检修系统

系统大体工作过程为在线监测过程通过多种方式收集配电设备运行状态信息及环境参数，经由可靠的通信方式将状态数据汇聚到后台管理中心，后者对状态信息进行分析与评估，做出设备运行状态评价、故障预警或为管理人员提供故障评价参考依据。系统各部分构成元素功能如下：

(1) 在线监测系统。依据状态检修的要求，在线监测要确定监测系统的功能及性能，包括监测的内容范围、频率、精度要求等。

(2) 数据分析模块。数据分析将在线监测过程取得的原始数据进行提炼、分析, 为状态分析提供所需的足量的、标准的数据依据。

(3) 标准状态与状态变化。标准状态是事先经确定的标准等级, 诊断系统依据标准状态来确定设备正常工作的标准。状态变化反应在系统中是在线监测所获取的监测参数的变化, 用来与标准状态进行比较。

(4) 状态诊断专家系统。对状态的诊断是实现状态检修的核心, 状态诊断专家系统负责确定状态及状态发生变化的机理、原因或变化趋势, 提供检修依据或建议。

在线监测与状态检修系统相关的技术主要包括设备状态监测与故障诊断技术和状态信息管理与决策技术两大部分。发展现状如下:

#### 1.4.1 设备在线监测与故障诊断技术

设备在线监测是故障在线诊断和离线分析的基础。国内, 发电环节的状态监测技术已经达到相当高的水平, 我国科技工作者已开发出了一系列状态监测系统, 并成功地应用于生产实践, 同时国外的技术成熟度与应用状况相较而言更为成熟。美国电力研究院下属的监测诊断中心利用先进的测量技术和分析软件, 对美国 50 家最大的电力公司的电厂、电网中 80% 的设备进行了在线监测和故障分析, 了解设备的运行状况和健康水平, 并据此制订设备维护和检修计划。加拿大魁北克水电公司也开发了一种在线状态监视系统, 使机组维修和专业技术人员不停机就能了解水电机组的状态。从 20 世纪 70 年代初至今, 故障诊断技术的研究已经由单一地偏重故障机理与诊断方法的研究发展到故障诊断专家系统的研制开发。

此前相当长一段时间我国在线监测与故障诊断技术主要侧重于电力高压侧的发变领域, 配电侧的研究与应用则相当缺乏。配电设备在线监测与状态检修是配电网自动化的重要组成部分, 随着国家电网公司建设坚强的智能电网计划的提出, 配电网自动化技术开始受到越来越多的关注, 配电设备在线监测与状态检修技术将进入一个快速发展阶段。

#### 1.4.2 状态信息管理与决策技术

随着计算机技术的发展, 世界各国从不同的管理决策目标出发, 形成了不同的管理与决策系统。芬兰的 IVO 输电服务公司开发的变电站检修管理系统 (SOFIA) 建立在对变电站的长期检修计划的基础上, 以寿命周期费用 (Life Cycle Cost, LCC) 为评价依据, 使用设备的劣化模型 (状态模型) 来估计设备将来状

态。德国提出将供货商管理层所有功能融为一体的管理模式，以减少中间环节。

后面章节围绕配电网中的重要设备及环节，介绍在线监测与状态检修系统的重要技术，包括以电缆及电缆隧道、开关柜、配电变压器、站所建筑物等作为监测目标时所采用的不同技术。从底层技术到上层系统给出配电设备在线监测及状态检修的完整描述。

# 电缆及隧道在线监测及状态评价技术

电力电缆在电力系统中的应用越来越广，保障电缆线路的安全运行是对电力系统运行的基本要求。电缆故障的实时监测变得越来越重要。影响隧道电缆安全运行的因素有很多，主要包括电缆自身温度及隧道环境情况（主要指隧道内空气温度、积水、有害气体等）。电缆及隧道在线监测及评价技术一方面提供对电缆自身及周边运行环境的监测，做到故障预防；另一方面能够在故障产生的情况下快速进行故障定位，涉及的关键技术主要包括电缆温度的监测技术、电缆故障的定位技术、隧道环境参数的监测及隧道环境视频监测技术等。状态评估技术则是利用在线监测过程取得的数据，通过特定评价算法进行电缆及隧道状况的评估，为管理员提供参考意见。

## 2.1 电缆温度在线监测技术

工作温度的升降反映了设备运行状态和许多物理特征的变化，工业设备运行异常或故障通常表现出温度的异常变化。温度升高是引起电缆故障的重要因素，因为无论是电缆的老化或负荷的增加引起的泄漏电流增大和损耗增加，其主要形式都将会在温度方面反映，相对而言，温度是一个非电气物理量，在防电磁干扰和电气隔离方面比较容易实现，因此可靠性较高。近年来，电缆温度监测已经成为国内外电缆监测的一项重要手段。

目前，电缆温度在线监测技术主要包括点式温度传感技术、基于热效应的电力电缆在线监测技术、线式温度传感技术、光纤传感器技术。

### 2.1.1 点式温度传感技术

点式温度传感技术是在测温的现场根据需要设置多个点式传感器（如热偶、热阻和热继电器等）以测得空间特定点的温度，并通过相应的缆线将温度模拟量或越限信号上传至主机进行处理的技术。点式温度传感技术主要采用基于温度传



传感器或者热电偶测量技术，将温度传感器或热电偶置于线路中易发生故障的地方，如电缆终端和中间接头或电缆有局部热源处，用来监测这些部位的温度<sup>[1]</sup>，见表 2-1。

表 2-1 几种点式传感器比较

类型	测温原理	分类	优缺点
热电阻传感器	金属导体的电阻值具有随温度增加而增加的特性	1. NTC 热电阻传感器； 2. PTC 热电阻传感器	热电阻是中低温区最常用的一种温度检测器。其主要特点是测量精度高、性能稳定，其中铂热电阻的测量精确度是最高的
热电偶传感器	热电偶的测温原理基于热电效应	1. PtRh10-Pt 热电偶； 2. NiCr-NiSi (NiCr-NiAl) 热电偶； 3. 铜-康铜热电偶； 4. 镍铬-康铜热电偶	具有极高的响应速度，可以测量快速变化的过程，灵敏度较低，容易受到环境干扰信号影响，不适合测量微小的温度变化

温度监测系统在国内外研究的方法很多，目前比较成熟的是主从式监测系统，即由工控机；单片机以及温度传感器组成测温系统，在国内电缆测温中应用最为广泛。如鞍钢供电厂于 2001 年 3 月在 101 变电站安装电力电缆温度在线监控装置，用于监测 101 变电站电缆终端头、电缆桥架上电缆中间接头、电缆本身的运行温度，以此检测电缆及接送的绝缘状况，该套装置是由主机、通信机、下位机、RS-485 总线和传感器构成的主从式网络；还有分别于 2005 年 2 月和 2005 年 5 月在安徽、陕西 2 个火电厂的电缆沟中投运的电缆接头在线监测防火测温系统，系统由 DS18B20 数字温度传感器、LTM8003 数字测温模块、上位机等组成；佳木斯发电厂采用的电缆温度监测系统也是温度监测系统<sup>[2]</sup>，由于

电缆沟和各测点离主控室主机较远、测点分布广，且现场环境较复杂、干扰较多，因此也采用了这种基于工控机、单片机、温度传感器的主从式测温系统等，根据以上实例，可将这种主从式测温系统的原理总结如图 2-1 所示。

从图 2-1 中可以看出，系统主要由五大部分组成，即温度传感器部分、现场工作子站部分、工作站计算机部分、数据传输总线部分、系统软件部分<sup>[3]</sup>。

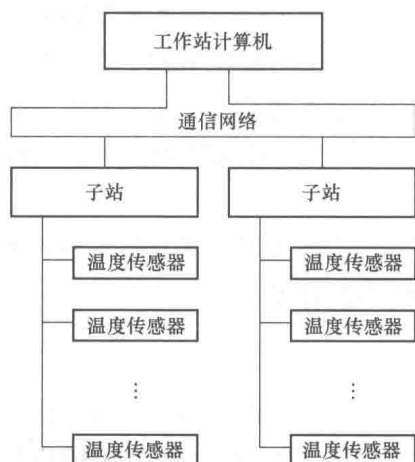


图 2-1 主从式测温系统原理