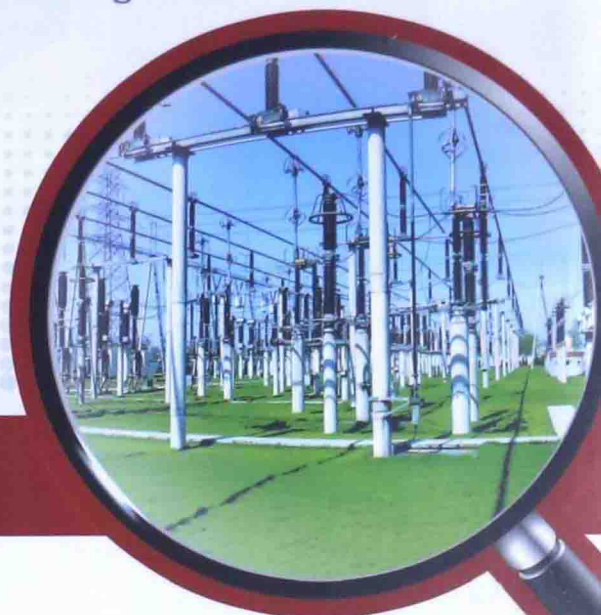


Live Testing Technology and Fault Diagnosis
of Electrical Power Unit



电气设备带电检测技术 及故障分析

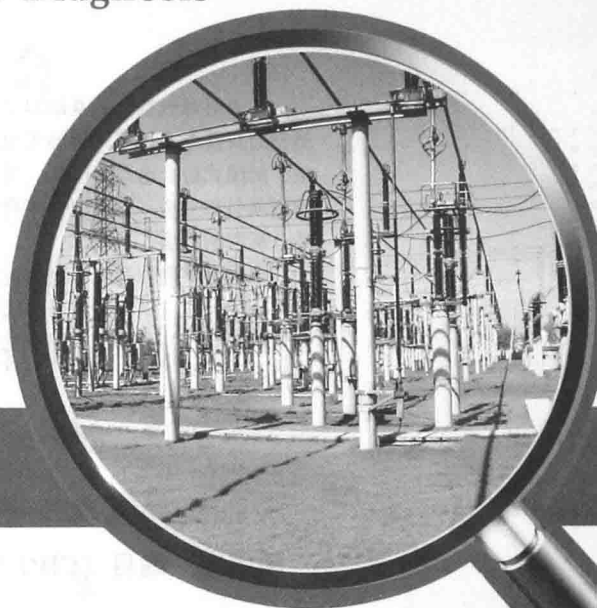
国网湖南省电力公司星沙培训分中心 组编

张国光 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Live Testing Technology and Fault Diagnosis
of Electrical Power Unit



电气设备带电检测技术 及故障分析

国网湖南省电力公司星沙培训分中心 组编

张国光 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书对带电检测的基础知识和检测基本方法进行了讲解,按照检测方法与设备类型对目前电力系统开展的带电检测项目进行了详细说明,内容涵盖了高压开关柜、封闭式组合电器(GIS)、变压器、高压断路器、互感器、避雷器等设备带电检测项目和方法,并选取一些典型的故障案例进行分析,总结和提炼出带电检测故障分析判断方法。

本书可供电力系统变电运行、变电检修、电气试验等技术人员及相关工程管理人员阅读,也可供大中专高等院校相关专业师生和制造厂家参考,也可作为电力、电气、航空、冶金、信息等专业技术人员培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电气设备带电检测技术及故障分析/张国光主编;国网湖南省电力公司星沙培训分中心组编. —北京:中国电力出版社,2015.1

ISBN 978-7-5123-6956-6

I. ①电… II. ①张… ②国… III. ①电气设备-带电测量 ②电气设备-故障诊断 IV. ①TM93②TM07

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第300033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

*

2015年1月第一版 2015年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20印张 493千字

定价 55.00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 任 李文利

副主任 林 盾 李喜桂 潘志敏 梁勇超

委 员 章建平 罗电兵 雷红才 唐 信

陈桃清 吴学斌 黎 刚 毛文奇

罗志平 张 欢 邓 维 张国旗

李 浙 熊 云 张 寒

主 编 张国光

副主编 沈梦甜 魏力争

参 编 孙泽文 张国熠 毛学锋 陈昌雷

阳应伟 全朝春 李哲文 姜赤龙

陈润颖 肖 军 符劲松 陈柯良

王 昂

主 审 刘卫东

前 言

本书针对带电检测技术在电力系统设备上的应用进行了阐述，为带电检测学习培训提供了参考工具，也是停电例行试验及在线监测的有力辅助与指导。

本书对带电检测的基础知识和检测基本方法进行了讲解，按照检测方法与设备类型对目前电力系统开展的带电检测项目进行了详细说明，内容涵盖了高压开关柜、封闭式组合电器(GIS)、变压器、高压断路器、互感器、避雷器等设备带电检测项目和方法，并选取一些典型的故障案例进行分析，总结和提炼出带电检测故障分析判断方法。由于全国带电检测的项目开展参差不齐，本书带电检测的案例存在局限性，但在编写中立足于现场实际案例，尽量做到通俗易懂。

全书共有十章，第一章由沈梦甜、姜赤龙编写；第二章由魏力争、姜赤龙编写；第三章由张国光、肖军编写；第四章由张国熠编写；第五章由张国光、陈昌雷、孙哲文编写；第六章由张国光、陈昌雷、符劲松编写；第七章由张国光、阳应伟、陈润颖编写；第八章由王昂、全朝春、李哲文编写；第九章由魏力争、毛学锋编写；第十章由沈梦甜、陈柯良编写，全书由张国光统稿。

本书编写得到了国网湖南省电力公司人力资源部、国网湖南省电力公司运维检修部、国网湖南省电力公司检修公司、国网长沙供电公司、浙江国华浙能发电有限公司的大力支持，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2014年11月

目 录

前言

第一章 带电检测基本理论

第一节 带电检测基本概述	1
第二节 带电检测背景及意义	7
第三节 带电检测的特点	8

第二章 带电检测基本方法

第一节 超声波检测	12
第二节 高频、超高频局放检测	15
第三节 红外测温	18
第四节 紫外成像	24
第五节 全电流及阻性电流测量	26
第六节 暂态地电位 (TEV)	27
第七节 相对介损测量	28
第八节 脉冲电流法	30
第九节 射频检测	32

第三章 红外测温

第一节 红外测温基础知识	34
第二节 红外检测仪的操作方法和技巧	35
第三节 电气设备红外测温特点及判断方法	46
第四节 电气设备红外测温典型故障分析	59

第四章 紫外检测

第一节 紫外成像基础知识	118
第二节 紫外仪操作方法与技巧	119
第三节 电气设备紫外成像特点及判断方法	123
第四节 电气设备紫外成像典型故障分析	127

第五章 高压开关柜设备带电检测

第一节 高压开关柜的结构	132
第二节 高压开关柜的故障类型	136
第三节 高压开关柜的带电检测方法	138

第四节	高压开关柜典型故障分析	146
第五节	开关柜局部放电检测仪器	165
第六节	仪器的基本使用方法	167

第六章 封闭式组合电器 (GIS) 设备带电检测

第一节	GIS 设备的结构	171
第二节	GIS 设备的故障类型	176
第三节	GIS 设备的带电检测方法	182
第四节	GIS 设备故障超声诊断案例分析	186
第五节	试验仪器	211

第七章 变压器设备带电检测

第一节	变压器的结构	217
第二节	变压器常见故障类型	222
第三节	变压器设备的带电检测方法	236
第四节	变压器设备典型故障分析	240
第五节	主变压器局放检测仪器与操作方法	259
第六节	铁芯接地电流测量	262
第七节	变电站主变压器综合智能在线监测系统	265

第八章 高压断路器设备带电检测

第一节	高压断路器设备的结构	270
第二节	高压断路器设备的故障类型	273
第三节	高压断路器设备的带电检测方法	274
第四节	高压断路器设备典型故障分析	278

第九章 互感器设备带电检测

第一节	互感器设备的结构	280
第二节	互感器设备的故障类型	285
第三节	互感器设备的带电检测方法	286
第四节	互感器设备典型故障分析	292

第十章 避雷器设备带电检测

第一节	避雷器设备的结构	299
第二节	避雷器设备的故障类型	300
第三节	避雷器设备的带电检测方法	301
第四节	避雷器设备典型故障分析	302

参考文献

带电检测基本理论

第一节 带电检测基本概述

一、状态监测介绍

状态监测技术在 20 世纪 40~50 年代首先应用到火力发电行业，目的是为了提高发电效率、缩短停机时间、减少停电次数、确保安全生产。

随着经济与科学技术的快速发展，电网规模的不断扩大，输变电设备状态监测系统已经得到广泛应用。各种在线监测数据、图像、视频和抢修车辆位置等信息能直观显示在大屏幕上，使监控人员能及时监视设备运行情况，准确判断设备状态和现场情况，指挥车辆和专业人员处理各种输电线路的检修和抢修工作。

某电力公司状态监测中心如图 1-1 所示。

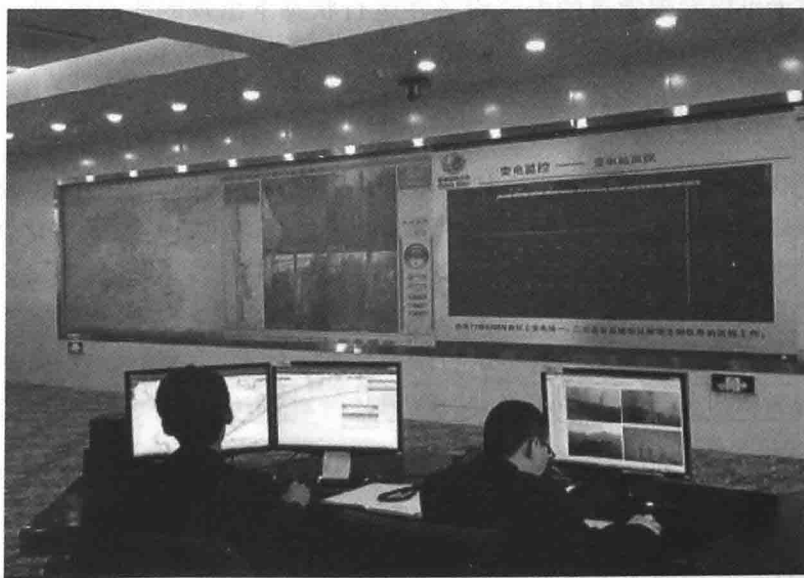


图 1-1 某电力公司状态监测中心

状态监测在电力系统应用方面非常广泛，其实质是要求分析设备的当前状态及未来趋势，在发生故障之前提出检修计划，做到防患于未然，是状态设备的技术基础之一。从电气试验方面主要分为两类：在线监测和带电检测。

在线监测技术 (online monitor) 指在电气设备的运行状态下，通过特殊的试验仪器 (仪表装置及互感器)，对运行状态下的电气设备状况进行连续自动检测。它用于实时监测被

测设备及装置时状态，及时发现运行中的电气设备所存在的潜在性的故障。它可以测出电气设备在所测时刻下的使用状态，便于及时发现设备的隐患，了解隐患的变化趋势等，可以发现常见的电气设备在运行状态下出现的所有问题。在线监测是智能变电站状态监测的主要实现技术手段，占有越来越重要的地位。

带电检测技术是在线监测的前身，它可以根据现场情况进行检测方案和测试手段的调整，具有很高的灵活性与机动性，同时也是在线监测的必要佐证，其作用是在线监测与停电例试不可替代的。

二、带电检测的定义

带电检测是指在电气设备运行状态下，对其所做的检测，只做电气检测，不做机械检测。带电检测利用传感器、电子计算机等技术，通过对运行中高压设备的信号采集和传输、数据处理，来实现对电力设备运行状态的带电测试或不间断的实时监测。

带电检测与停电例试的区别在于停电例试是通过停电试验来查看设备的电气特性和机械特性，停电例试也称为电力预防性试验。

三、带电检测的范畴

带电检测主要针对电气一次设备，即直接用于生产、输送、分配和测量、补偿的电气设备。它包括发电机、变压器、断路器、隔离开关、母线、输电线路、电力电缆、电抗器、互感器、避雷器等。

带电检测技术可以发现常见的电气设备在运行状态下出现的所有问题。例如：局部放电、发热、气体泄漏等可能造成重大事故的隐患。

四、带电检测的系统组成

带电检测是状态监测的一种手段，其原理是通过检测互感器将能够反映设备状态的参量传输到计算机，经过信号处理获得表征设备特征参数，与以往历史数据及经验进行比较来判断设备的状况。带电检测的过程如图 1-2 所示。

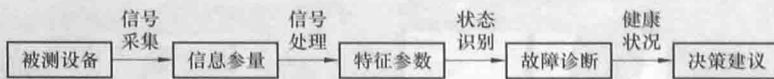


图 1-2 带电检测的过程

它主要包括以下几个部分：

(1) 信号变送。由相应的传感器从电气设备上检测出那些反映设备状态的物理量，并将其转换为合适的电信号，传送到后续单元。

(2) 信号处理。对传感器变送来的信号进行预处理，对干扰信号进行抑制。

(3) 数据采集。对经过处理的信号进行采集、A/D 转换和记录。

(4) 信号传输。将采集到的信号传送到后续单元。

(5) 数据处理。对所采集到的数据进行处理和分析。

(6) 故障诊断。对历史数据和当前数据分析、比较后诊断。

五、带电检测与在线监测的区别

在线监测系统采用分层分布式结构，由传感器、智能组件 IED 及监测后台组成，各个状态监测单元通过统一的 IEC 61850 协议与监测后台系统通信。监测后台具有各种监测功能的数据采集存储、故障报警、故障诊断等功能。在线监测系统，都是计算机自动操作识别，对整个监测系统的软件及硬件性能有很高的要求，其部件多，自身维护量及维护难度也相对增加，同时系统自身检测及验证系统要完善，要有自我故障诊断修复功能，监测模式固定。

带电检测系统由传感器、检测仪器、人组成，人为的因素在整个检测过程中影响很大。人的主要行为对仪器操作，数据采集、存储，分析，故障诊断等方面全程干预。此系统具有成本相对较低，可靠性、灵活性高的特点。从功能上看，带电检测与在线监测具有行为互补性，两者也有很大的区别，主要表现在以下几个方面。

1. 传感器安装模式

在线检测传感器需要预先安装好；而带电检测传感器既可以预先安装，也可以现场检测时安装，如图 1-3 所示。

2. 接线方式

在线监测系统在初次安装后就不再需要接线，带电检测现场检测时需要进行接线。

3. 数据存储分析

在线监测系统在现场实时检测，后台智能系统对检测数据自动处理，具备分析判断、故障诊断、告警及故障处理建议的功能。带电检测现场检测时需要进行人工数据保存、现场初步分析。

4. 后续工作

在线监测不存在后续工作，如数据可以自动对比分析。带电检测工作结束后，要进行后续数据管理、报告报表处理等大量工作。

5. 成本及工作量

带电检测成本相对较低，人员因素是主要角色，在各个变电站之间奔波较为辛苦，工作量较大。在线监测系统较为复杂，成本相对较高，人员因素是辅助角色，维护成本较高。

六、带电检测的工作原理

设备故障一般是一个渐变的过程，发展时间长。根据故障部位可分为内部与外部，外部故障可以很容易检测到，如设备表面放电、外连接排发热等；而内部故障肉眼无法观察到，且部位隐蔽、信号传输时衰减较大，初、中期不易被检测到，有时随着外部的温湿度环境、负荷变化而变化，如主变压器内部局部放电、连接螺栓松动等。

如图 1-4 所示，当电气设备内部发生故障时，往往伴随有相应的宏观效应，如光效应、压力波、电荷效应（介质损耗变化、产生高频电磁波）、化学效应及热效应等。

针对以上效应，产生了多种带电检测方法。

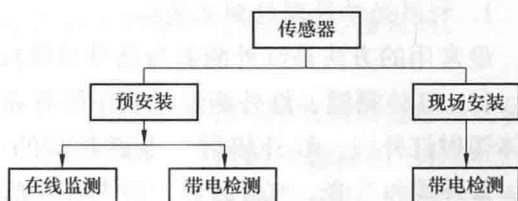


图 1-3 传感器安装模式

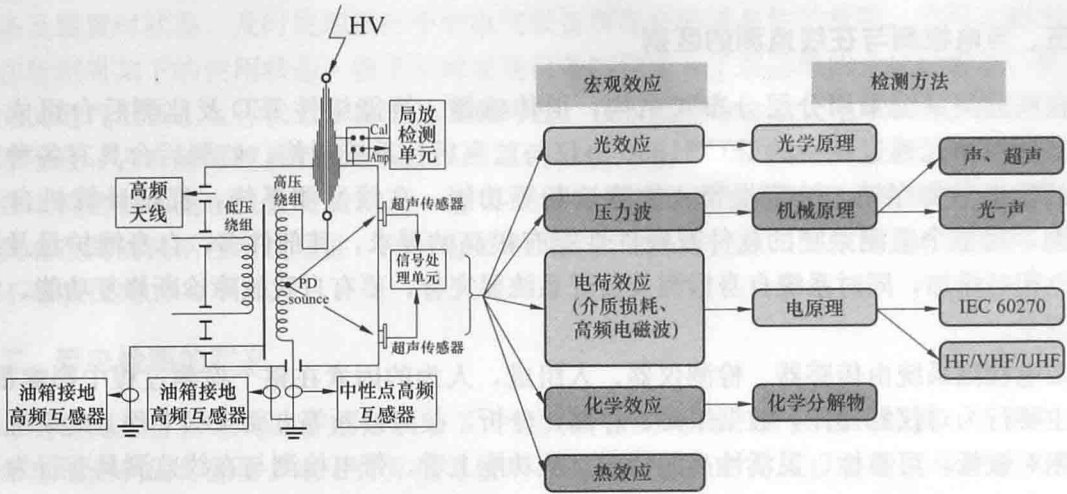


图 1-4 局部放电现象及检测原理

1. 利用光学原理检测光效应

最常用的方法是红外测温与紫外成像仪。

(1) 红外测温。红外测温是利用所有物体都可以辐射出的红外能量，红外测温仪可捕捉物体辐射红外线。红外辐射是电磁频谱的一部分，电磁频谱中包括无线电波、微波、可见光、紫外线和 X 光。红外线介于频谱可见光和无线电波之间。红外线波长通常以微米表示。红外光谱分为三个区域：近红外区 ($0.78 \sim 3\mu\text{m}$)、中红外区 ($3 \sim 50\mu\text{m}$) 和远红外区 ($50 \sim 1000\mu\text{m}$)。一般来说，近红外光谱是由分子的倍频、合频产生的；中红外光谱属于分子的基频振动光谱；远红外光谱则属于分子的转动光谱和某些基团的振动光谱。

(2) 紫外成像仪。紫外成像仪可在日光下，远距离检测设备的电晕及电气放电现象。它为发现、监控运行设备的潜在故障提供了一种有效的检测手段，得到世界各国的广泛应用。当带电体的局部电压应力超过一个临界值时，会使得游离的空气产生电晕从而放电，电晕放电属于一种局部化的放电现象。特别是对于高压电力设备来说，由于种种原因，比较容易产生电晕、电弧等。在这个放电过程中，空气中的电子不断获得和释放能量，而当电子释放能量（即放电）时，便会放出紫外线。紫外成像仪就是依据这个原理而来的。接收设备放电时产生的紫外信号，经处理后与可见光影像重叠，显示在仪器的屏幕上，达到确定电晕的位置和强度的目的，从而为进一步评估设备的运行情况提供更可靠的依据。

2. 利用机械原理检测压力波

机械波是机械振动在介质中传播而形成的波。按介质中质点振动方向和波传播方向间的关系，可分为横波和纵波两种。质点振动方向与波传播方向垂直的叫横波；在一条直线上的则叫纵波。固体中既能传播横波，又能传播纵波；液体和气体中只能传播纵波。机械波产生的条件有两个：一是要有做机械振动的物体作为波源，二是要有能够传播机械振动的介质。利用机械波原理检测波效应，最常用的方法是噪声测试与超声波测试。

(1) 噪声测试。电气设备在运行过程中产生不同声响噪声，为防止这些设备噪声对周围居民生活工作和学习造成影响，国家环境保护部发布了相关标准。“声强测量法”是噪声测量的常用方法之一，这种方法的基本原理是：根据两个邻近放置的压敏微音器之间中点处的声压梯度变化，用有限差分法近似求得该处声波质点的振动速度，瞬时声压和它相对应的瞬

时质点速度之积的时间平均值，便是该处的声强。将空间平均声强乘以相应的面积，便可求得噪声输出功率，声强法能够对真实负载条件下实际运行的变压器进行噪声测量。

(2) 超声波测试。当电气设备内部发生局部放电时，由于分子的激烈撞击，气泡的形成和发展，液体的流动以及固体材料的微小开裂会发出超声波。如图 1-5 所示，超声波向四周传播开来，经过气体介质和钢板一直达到电气设备容器的表面。在这过程中，声波不但要在单一媒质中产生衰减，而且还会在不同媒质的界面上产生反射、折射以及在声特性阻抗不匹

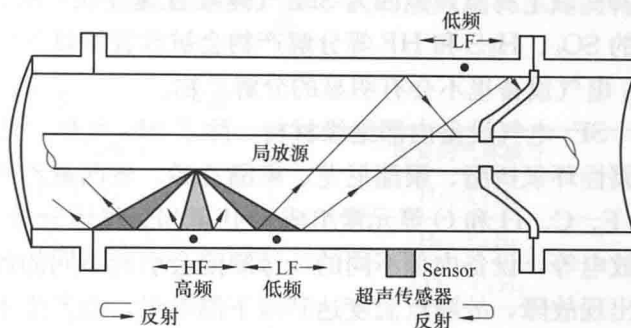


图 1-5 超声波传播示意图

配的两种媒质界面上产生衰减。由于超声波在钢中传播速度比在气体中大得多，在钢中衰减比在气体中衰减也大得多，因此，探头接收到的超声波主要是由气体介质传播来的。

3. 通过电原理检测电荷效应产生的局放现象

通过电荷效应进行电磁波检测，从检测到的电磁波信号中提取有用的局放信号是比较重要的工作。在抑制干扰、提取局放信号方面，有人提出了动态频谱的概念及相门控制方法。从动态频谱的测量（采用小波变换）可以看出局放水平的变化趋势，但只限于甚高频（VHF）范围，对于特高频（UHF）法检测是否有效还需要进一步的研究。相门控制方法可以分离局放信号与电晕干扰，但这种方法是基于放电相位判别技术的，它的有效性依赖于相位判别技术的进一步发展。目前开展项目有暂态地电位、高频超高频局放检测。

UHF 法于 20 世纪 80 年代初期由英国中央电力局（CEGB）实验室提出。UHF 法通过安置在 GIS 中的传感器检测局放电磁波的 UHF（300MHz~3GHz）部分。UHF 法有较强的抗干扰（通常的噪声干扰频率都在 500MHz 以下，电晕干扰在 100MHz 以下）及局放源定位能力（理论上可以小于 10cm），但随着与局放源距离的增大，信号衰减很大（约 2dB/m），导致传感器间的距离较小（5~10m），因而在线检测也需要为数不少的传感器。高频与超高频原理类似，只是互感器接收的频率不同。

暂态地电位在所有的固体绝缘材料内部，由于制造因素都存在小空隙，这些小空隙通常是十分微小的。在使用中，绝缘体一端接地，另一端接高压，使小空隙像小电容一样充电，当充电到一定程度时，它们就放电，同时产生各种物理、化学现象，如电荷交换等，日益增多的碳将导致空隙导通。这将增加作用在相邻空隙的电气压力，重复上述过程，使得绝缘体的空隙充分导通，最后导致绝缘击穿。

通过放电产生的电磁波脉冲大部分通过周围的金属制品传输出去，通过设备的金属外壳表面而传到地下去。通过研究发现，这种 TEV 信号直接与同一型号、在同一位置测量的设备的绝缘体的绝缘状况成正比。

4. 通过化学分解产物检测化学效应产生的局放现象

化学分解产物主要是油中与气体中的局放现场产生的分解物。

(1) 气体成分分析。电气设备可分为有电弧产生的断路器和无电弧产生的变压器、互感器、避雷器、电容器、隔离开关、接地开关、套管、母线两大类。

正常运行的 SF₆ 电气设备，内部温度不高于 80℃，SF₆ 气体不会分解，也不会与其他材料发生反应。在非电弧气室中没有分解产物；在有电弧的断路器室中，分合闸动作会产生 2000℃ 以上高温，但因为 SF₆ 气体复合速度快，灭弧能力强，复合率达 99.8%，所剩余少量的 SO₂、H₂S 和 HF 等分解产物会被放置于设备内部的吸附剂所吸收。因此，正常运行的 SF₆ 电气设备里不会有明显的分解产物。

SF₆ 电气设备内部绝缘材料，除了 SF₆ 气体，还有固体绝缘材料。固体绝缘材料主要有热固性环氧树脂、聚酯尼龙、聚酯乙烯、聚四氟乙烯、绝缘纸和绝缘漆等。以上绝缘材料由 S、F、C、H 和 O 等元素组成。引起 SF₆ 气体分解的主要原因有局部放电、火花放电和电弧放电等，设备内部不同的绝缘缺陷会引起不同的放电类型，产生不同的电能和温度。当设备出现故障，故障点温度达到以下温度时，会产生不同的分解产物。

- 1) 故障点温度达到 130℃ 时，聚酯尼龙、聚酯乙烯、纸和漆开始分解，主要产生 CO₂、CO、低分子烃和少量的 SO₂。
- 2) 故障点温度达到 400℃ 时，聚四氟乙烯开始分解，主要产生 CF₄。
- 3) 故障点温度达到 500℃ 以上时，SF₆ 气体、环氧树脂开始分解，主要产生 SO₂、SOF₂、H₂S、CF₄、CO、CO₂ 和低分子烃等。

(2) 油色谱分析。在变压器局部放电的电、热作用下，变压器油会裂解为 CH₄、C₂H₂、C₂H₄、C₂H₆ 等有机低分子气体，同时还有 H₂、CO、O₂、CO₂ 等无机气体，这些气体都会溶解在变压器油中。通过检测油中的这些气体的成分和含量，就可推断变压器内的绝缘情况。

目前，油中气体的色谱分析法已被广泛应用在油浸变压器绝缘的检测中，对于预防变压器的潜伏性故障，取得了较好的效果。目前常用和比较成熟的方法主要是变压器油中溶解气体的气相色谱分析法，其基本原理是先将油中气体脱出，再以 H₂、N₂、Ar 为载气将油中脱出的气体一部分经镍触媒转化后经火焰离子化器 (FID) 以测量 CO 和 CO₂；另一部分经导热池 (TCD) 可测出 H₂、O₂，而烃类气体仍旧由 FID 测出。

变压器油的劣化因素一般分为氧化、局部过热和局部放电三种，其中危害性最大的是局部过热和局部放电，因为此时不仅使油发生劣化，更为严重的是还将危及设备的自身安全。

油中含有氧气时，电力用油（如变压器油）和氧气会发生氧化反应，油温越高，氧化反应越强烈。氧化反应的结果会生成饱和碳氢化合物、稳定的氧化物、有机酸、水分、中性高分子树脂以及沥青质等。变压器在带负荷运行时，线圈和铁芯中的涡流与磁滞损失皆会转化为热量。这些热量在正常情况下主要是利用油的热传导和热对流作用，依靠油在变压器和散热装置内的不断循环流动而散发。若这些热量不及时散发，有相当部分热量会使变压器油、纤维素材料分解，断开油或纤维素的分子键形成劣化物。在过热区附近，变压器油会发生分解，产生 CH₄、C₂H₂、C₂H₄、H₂ 等气体；纤维素材料热分解会产生 CO、CO₂ 等气体。

局部放电产生的带电粒子撞击油分子使油发生裂解。弱放电时，裂解产生的气体主要是 H₂ 和 CH₄；强烈火花放电和电弧放电时，主要产生 C₂H₂ 和 H₂，放电涉及固体绝缘时，也会产生的 CO、CO₂ 气体进入油中。

油的劣化速度与下列因素有关：空气中的氧气及浸入油中水分的多少，运行油的温度，固体绝缘材料的分解变化，各种裸金属及组合对油的催化作用，电场磁场等。

绝缘纸/纸板分解的主要产物是 CO 和 CO₂，其形成量随氧含量和水分含量的增加而增加。在相同的温度下，绝缘纸/纸板劣化产生的 CO、CO₂ 远比油劣化所产生的量大，因此

油中 CO、CO₂ 气体主要是反映绝缘纸/纸板劣化的指标。利用油中溶解气体分析进行设备内部故障判断的原理正是基于绝缘材料的这种产气特点。不同的故障，由于故障点能量不同、温度不同以及涉及的绝缘材料不同，其产气情况也不同，即不同的故障具有不同的特征气体，见表 1-1。

表 1-1 不同故障类型所产生的气体

故障的类型	主要的气体成分	次要的气体成分
油过热	CH ₄ 、C ₂ H ₂	H ₂ 、C ₂ H ₆
油及纸过热	CH ₄ 、C ₂ H ₂ 、CO、CO ₂	H ₂ 、C ₂ H ₆
油纸中局放放电	H ₂ 、CH ₄ 、C ₂ H ₂ 、CO	CO ₂ 、C ₂ H ₆
油中火花放电	H ₂ 、C ₂ H ₂	
油中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂	C ₂ H ₆ 、CH ₄ 、C ₂ H ₄
油纸中电弧	H ₂ 、C ₂ H ₂ 、CO、CO ₂	C ₂ H ₆ 、CH ₄ 、C ₂ H ₄
受潮或油中气泡	H ₂	

第二节 带电检测背景及意义

一、带电检测发展历程

电气试验是保障电力系统设备安全运行的重要组成部分，通常分为停电试验与带电检测两个部分，然而电力系统设备安全可靠性的要求越来越高，传统停电试验的局限性也越来越明显。近年来兴起的状态检修是一种先进的设备检修管理机制，是社会生产力的发展在检修领域的具体体现。状态检修的技术基础是设备状态的准确评价，根据监测手段所获取的各种状态信息，分析故障发生的现象，评估故障发展的趋势，依据设备的重要程度而采用不同的检修策略，并合理地安排检修时间和检修项目，使设备状态“可控、在控”，保证电力设备安全经济运行。状态检修起源于 20 世纪 60 年代美国航空工业，接着在军舰、核工业的检修中采用，并很快在电力行业中采用。现今在国外，例如美国、加拿大、法国等国家已经推行输变电设备状态检修的先进方法多年，他们具备完善的监测系统、先进的测量设备，以及一整套科学的管理方法。

20 世纪 90 年代以来，应用状态监测技术以及发展新的状态监测技术已成了变电站电气设备检测最重要的任务之一。两方面原因促成了这种需要：首先，变电站电气设备的安全运行非常重要，任何意外故障都可能造成重大事故，停电会带来巨大的经济损失，影响居民优质电力服务，而设备本身是变电站的贵重资产并消耗大量维护费用。应用状态监测技术可以避免设备故障，最大限度地缩短停电时间，减少维护费用，它为设备状态检修提供了大量有价值的信息，有很大的经济效益。其次，计算机技术、传感器技术、信号处理技术以及人工智能技术的发展使得对电气设备实施有效的状态监测成为可能。随着状态监测系统在可靠性、智能化和经济性方面的进一步提高，带电监测技术在电力系统中应用越来越广泛。

国内外对输变电设备在线监测及带电检测技术的探索和研究已有 30 多年的历史。由于电气设备种类繁多、结构各异，其在线监测及带电检测项目各有不同，目前，带电检测技术

已经越来越广泛应用于变电设备状态检测。

二、带电检测背景

长期以来,预防性试验对保障电力系统安全运行起到了很大的作用。然而,随着电力系统向高电压、大容量、互联网发展,对电力系统安全可靠性的要求越来越高,传统预防性试验的局限性也越来越明显。主要体现在:预防性试验需停电、按固定周期进行,不能及时发现电气设备绝缘缺陷和反映设备即时状况;停电试验与设备实际运行状态在环境、状态参数(如工作电压、温度)等方面存在很大差异,预防性试验结果影响设备状态评价的准确性。状态检修是依靠先进检测手段和试验技术采集电气设备的各种数据信息,根据运行经验和运行工况综合分析判断后,确定设备检修周期和项目。其优越性主要体现在:能适时检修缺陷,预防设备事故发生,提高运行的安全可靠;可以延长检修周期,提高设备利用系数,延长设备使用寿命。状态检修共有七个环节,基础是状态监测,就是设备信息量采集,是检修发展的必然方向。设备状态评价是开展状态检修工作的基础,只有通过持续、规范的设备跟踪管理,对各种离线、在线监测数据进行综合分析,才能准确掌握设备实际运行状态,为进一步开展状态检修工作提供依据。

美国电力研究院(electric power research institute, EPRI)和施工规范协会(construction specification institute, CSI)的统计数据表明,在电力系统中实施状态检修可以提高设备利用率2%~10%,节约检修费用25%~30%,延长设备使用寿命10%~15%。在我国,国家电网公司于2008年颁布Q/GDW 168—2008《输变电设备状态检修试验规程》,为输变电设备的状态检修提供了参考,2013年修订Q/GDW 168—2013《输变电设备状态检修试验规程》,进一步规范了带电检测在状态检修中的应用。由此可见,开展状态检修可为电力企业带来巨大的经济和社会效益,是检修发展的必然方向。

因此,积极开展输变电设备带电检测新技术、新方法和新手段的研究和应用具有重要意义。

三、带电检测的意义

过去长期运行经验中逐步确立起来的离线(停电)预防性试验,曾为确保电气设备安全运行发挥过巨大作用。但随着电力系统的快速发展,离线预防性试验方式的执行出现了一些新的问题:一是由于试验需要停电、按固定周期进行,不能及时发现电气设备绝缘缺陷和反映设备即时状况,难以满足电力系统的实际需要。二是由于制造水平的提高和设备运维水平的提升,常规停电预试发现的缺陷已越来越少,使设备的有效性越来越不准确。三是试验工作量大幅增长与试验人员相对减少之间的矛盾。因此大力推广带电检测成为电气设备检测发展的一种必然趋势。通过带电检测技术的应用,一方面可以提高预试的有效性,另一方面也可以适当放宽停电试验周期,发现设备潜伏性放电故障,有效提高劳动生产率。

第三节 带电检测的特点

一、带电检测的优势

带电检测的优势在于电气设备在运行状态对其进行检测,判断其是否对用户整体的电气

设备长期、正常使用存在隐患，以便电力用户决定是否对其检修、更换或者采取其他的一些相关处理措施，从而排除故障隐患，有效避免电力事故和非计划停电。

(1) 带电检测是在设备正常运行的情况下检测，减少了停电次数，为电力用户带来了极大的方便。

(2) 电力设备运行状态下的安全隐患通过带电检测这一高科技设备与技术得到了解决。老式设备因设备严重老化，无法承受瞬时高压而不能进行停电打压试验，带电检测技术恰好弥补了这一缺陷，使用户对老式设备的运行状态也做到了如指掌。

(3) 带电检测可以依据设备运行状况灵活安排检测周期，便于及时发现设备的隐患，了解隐患的变化趋势。停电检测必须根据电力用户的实际情况，决定检测时间。

二、国内外实施情况

国内外对输变电设备在线监测及带电检测技术的探索和研究已有 30 多年的历史。由于电气设备种类繁多、结构各异，其在线监测及带电检测项目各有不同。目前，相对成熟应用的带电检测及带电检测技术有变压器、GIS 及罐式断路器等设备局部放电监测、变压器油色谱分析、电容性设备电容量及介损带电测试、氧化锌避雷器泄漏电流监测、红外测温、紫外检测等。

目前，带电检测技术主要包括红外线成像法、紫外线成像法和超声波检测法等。红外线成像法主要用来检测电气设备由于介电损耗或电阻损耗等引起的局部温度升高，目前已得到广泛应用。红外检测的技术局限性在于，由于红外辐射在固体中的穿透能力极其微弱（对金属导体的穿透厚度只有微米数量级，对于大多数非导电材料的穿透厚度也小于 1mm。因此，对于大型复杂电力设备内部的某些故障，若其故障发热功率太小，或故障部位距设备表面太远，由于热量的横向传递，会使得故障发热不能在设备表面产生明显的特征性响应。或者由于设备内部的热交换过程特别复杂，致使内部的故障发热无法在设备表面形成特征性热场分布。在这些情况下，红外成像法就难以从设备外部检测到内部的运行状态。

紫外线成像法主要用来检测设备表面由于局部放电而形成的碳化通道和电蚀损，检测导线外伤、高压设备的污染程度及绝缘缺陷检测等。紫外成像检测的技术局限性在于，检测光子数量受检测距离、增益、气压、温度、湿度等因素影响，目前尚无正式的紫外检测标准规程可供参考。

超声波检测法是利用超声波在绝缘介质界面发生反射、折射的原理，检测绝缘介质内部的裂纹缺陷。其优点是穿透力强、设备轻便、检测成本低、检测效率高，对危害性较大的裂纹类缺陷特别敏感。其缺点在于，通常需要耦合介质使声能透入被检物；需要有参考评定标准；显示的检测结果不直观，对操作人员的技术水平有较高要求。

纵观电气设备带电检测技术的发展趋势，目前设备监测状态量以绝缘状态量为重点，并逐步发展到机械量、化学量等有助于设备状态全面监测的状态量。在线监测技术的发展还呈现出一种综合趋势，即将设备的各种实时状态量通过网络集中起来，结合其他的非实时状态量，对设备的状态进行综合、全面分析，为设备的状态评价提供依据。

三、国内外带电检测应用现状

美国针对油中溶解气体分析、超声波探测、局部放电检测、红外测温等对试验数据的处

理运用模糊逻辑,通过分析判断对问题缺陷提出处理建议。日本 20 世纪 80 年代开始进入以状态监测为基础的预知维修时代,积累了大量数据与经验,逐步形成一些标准和较成熟的方法,如变压器寿命诊断上用温度特性、局部放电、纸的抗拉度、聚合度、 $\text{CO}+\text{CO}_2$ 等来预测剩余寿命。

经过 20 多年的探索实践和发展,我国已形成相对成熟应用的输变电设备带电检测技术,如变压器、GIS、罐式断路器设备局部放电,油色谱分析,红外测温,避雷器泄漏电流监测,电容性设备电容量及介损带电测试等。而红外成像仪、紫外成像仪和超声波检测仪等带电检测设备,随着技术的不断成熟,在我国电网系统应用越来越普遍。

1. 设备局部放电检测

电气设备的局部放电对电气设备的绝缘会产生不同程度的影响,严重情况下会导致绝缘介质击穿、设备故障,局部放电量水平的明显增加,可以表明设备内部正在发生变化,局部放电的在线监测是发现潜在绝缘故障的有效手段。

设备局部放电检测方法有脉冲电流法、DGA 法、超声波法、RIV 法、光测法、射频检测法和化学方法等。声—电联合、声—光联合等综合检测技术成为局部放电监测的主流方向。如某 500kV 变电站 3 号变压器局部放电监测系统采用声—电联合方式,能克服超声波检测无法定量和电测法抗干扰水平差的缺点,弥补定期局部放电测量周期长、跟踪程度不足的不足。2008 年 11 月 2 日 15 时 18 分,该站 3 号主变压器三相局部放电监测数据正常,C 相变压器从 15 时 19 分起超声通道局放监测急剧变化,由正常的 20pC 左右迅速增大到 8000pC 并内部绝缘击穿,变压器跳闸,整个放电过程总共持续了 8min。由于故障发展太快,值班员根本来不及采取任何措施。从该事例可以看出,变压器局部放电是可以实时监测的,但变压器局部放电跳闸技术还需进一步研究,只有与跳闸保护配合起来,局部放电监测才能发挥更大效益。

2. 红外测温

红外测温可在设备带电时动态监测电气设备的热故障点,为设备状态检修提供技术依据。无论是电流致热型、电压致热型或其他致热效应的设备,只要表面发出的红外辐射不受阻挡的输变电设备都属于红外诊断的有效监测范围,如输电线路、变压器、断路器、隔离开关、互感器、电力电容器、电抗器、避雷器、电力电缆等。

近年来,从检测方法、检测周期、缺陷处理、检测仪器、图谱报告等方面规范红外测温管理,及时排查各类电流致热型和电压致热型缺陷,其中以电流致热型引线接头和隔离开关触头发热缺陷为主。不仅可以发现接头过热,红外测温还可发现 TA、CVT、电磁式电压互感器、套管、避雷器等设备介损超标、油位下降、绝缘下降、漏磁通引起的变压器大盖螺栓发热等内部缺陷。

3. 避雷器带电检测

无间隙金属氧化物避雷器泄漏电流带电测试通过监视 MOA 运行全电流,分析基波及三次谐波阻性电流等,反映 MOA 运行中诸如受潮、老化等不良状况。通过计数器上附加的泄漏电流表可在线监测 MOA 全电流;而 MOA 带电巡检仪器能测量全电流与阻性电流,可动态监测避雷器的绝缘状况。总泄漏电流值的大小能反映氧化锌避雷器的绝缘状况,而其阻性泄漏电流值的大小是表征绝缘性能优劣的更敏感指标。

带电检测方法一般分为总泄漏电流法、阻性电流三次谐波法、补偿法、基波法等。