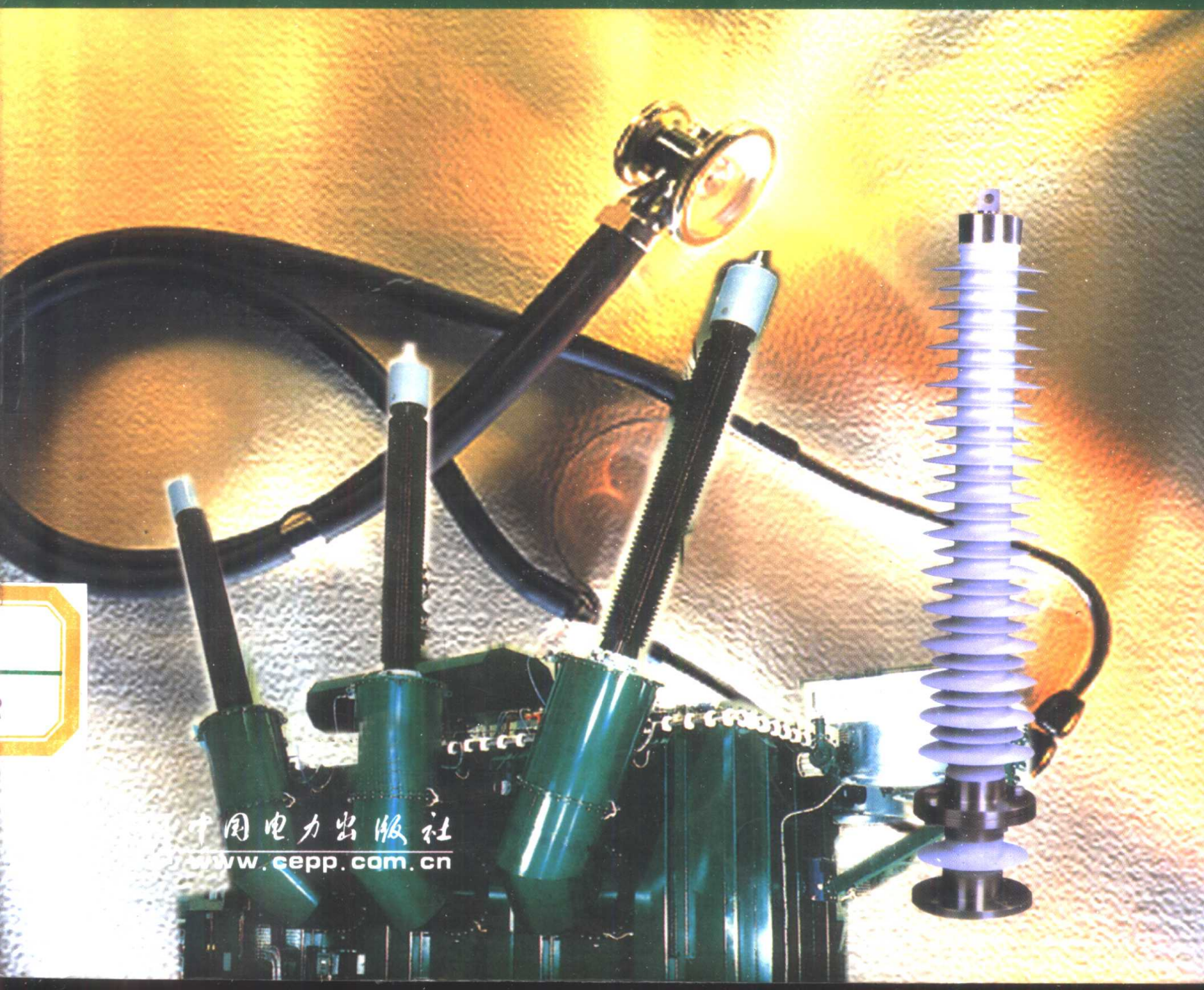


电力设备绝缘检测与诊断

成永红 编著

DIANLI SHEBEI
JUEYUAN JIANCE YU
ZHENDUAN



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力设备绝缘检测与诊断

成永红 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书介绍电力设备的绝缘检测与诊断技术。全书共分十章。第一章为概述；第二~九章分别介绍各类电气设备，包括电容器、绝缘子及套管、避雷器、高压断路器、GIS、电力电缆、电力变压器、发电机等的检测与诊断；第十章介绍了绝缘检测、诊断技术的新发展。全书内容广泛，既涉及传统的停电预防性试验、判断和带电测试，在线监测与诊断两方面的技术；又将成熟的技术与新发展的技术进行了有机地结合。

本书适用于电力系统运行部门或科研试验单位的技术人员阅读、参考，也适用于高等院校电气专业本科生或研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力设备绝缘检测与诊断/成永红编著. —北京：中国电力出版社，2001

ISBN 7-5083-0575-2

I. 电… II. 成… III. ①电力系统-电气设备-绝缘性能-检测②电力系统-电气设备-绝缘-故障诊断
IV. TM855

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 017893 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>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2001 年 8 月第一版 2001 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11 印张 244 千字

印数 0001—4000 册 定价 18.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

序

电力能源是现代经济发展的基础，电力设备的功能就是产生和传输电力能源。电力设备由导体、导磁材料和绝缘组成，其中绝缘是最重要的，它决定了电力设备的技术经济性能和运行可靠性。

电力设备的绝缘在运行中受到电、热和机械应力以及环境应力的作用，其性能会逐渐下降，或者说，绝缘状态会劣化，最终丧失绝缘的功能，这称为绝缘的老化。电力设备绝缘的老化是一个渐变的过程，如果不及时发现，就可能导致电力设备发生故障，甚至引发突发性的电力事故，造成巨大的直接和间接经济损失。为了了解电力设备的绝缘状态，避免或减少因绝缘故障引起电力设备损坏和非计划停电，进行绝缘检测和诊断是十分必要的。通过试验判断被试电力设备的绝缘状态，确定能否继续安全运行。

反映绝缘状态的量称为特征量，绝缘老化试验研究和电力设备故障大量统计分析是获取特征量的基础。不同的电力设备，因其绝缘系统不一样，反映绝缘状态的特征量也就不尽相同。有些量可以反映固体绝缘的性能是否劣化，还有一些量则与液体绝缘的劣化关系更为密切。有时单凭一个量还不能判断绝缘的劣化程度，往往需要根据一组特征量的试验数据才能正确地确定绝缘的状态。常用于评定固体绝缘状态的试验项目有测量直流泄漏电流、介质损耗角正切和电容量、绝缘电阻、介质吸收比和极化指数，以及局部放电的有关参量。单独与液体绝缘有关的试验项目有测量绝缘油中的微量水分，热氧化产物和不同故障产生并溶解于油中的气体。此外，还有用红外试验检查绝缘的缺陷或过热点。适合于各种电力设备的试验项目和要求性能指标都可以从相关的试验标准和试验规程中找到。几十年以来，电力部门都是每隔一定的周期对电力设备进行上述的有关试验，以预防电力设备发生事故，称之为预防性试验。预防性试验时，被试验的电力设备暂停运行，必须用另外的高压电源进行试验，因此，这种试验是属于离线试验。这种传统的预防性试验对于检查和发现电力设备中的绝缘问题，从而采取维修或更换措施（称之为预防性维修），保证电力系统的运行可靠性起了不可低估的作用。近年来国内外的一些电力部门开始采用电力设备绝缘在线监测技术，不需要外接高压电源，在电力设备照常运行的条件下随时读取试验结果，因此可以及时计划和安排电力设备的维修，从而实现状态维修。这是电力设备检测和维修的发展方向。实现在线监测的关键是采用先进的传感技术和现代数字信号处理技术。近年来，新的传感技术、信号处理技术和计算机技术的进步，推动了电力设备在线监测技术的急速发展。各类新式传感器，包括光纤传感器、电-光、磁-光和新型气敏传感器，广泛用于电力设备局部放电、微小电流的和微量气体的在线监测。数字滤波、小波分析和各种模式识别技术成功地用于绝缘在线监测中的干扰抑制、故障识别和定位。采用计算机技术，不但可对单台电力设备的单个参量进行监测，还可以建立对电力系统的全部电力设备进行状态监测和诊断的监控中心。

电力设备绝缘检测与诊断是近年来电气工程与科学研究的缺点，涉及到电气绝缘、高电压技术、传感技术、数字信号处理技术、电子技术和计算机技术诸多领域，发表的论文相当多，但是系统介绍这方面的书或教材还是很少见到。我很高兴看到《电力设备绝缘检测与诊断》这本书，它在介绍了各种电力设备的绝缘结构和材料的特征的基础上，阐述了基于这些特征进行预防性试验方法和在线检测与诊断方法，汇集了各种电力设备有关绝缘的试验规程，最后提出了今后绝缘检测与诊断的发展方向。此书深入浅出，内容丰富，实用性强，将对我国的电力设备绝缘检测与诊断技术水平的提高起到积极作用。

电力设备电气绝缘国家重点实验室 主任

谢恒堃 教授

目 录

序

第一章 概述	1
第一节 电力设备绝缘老化及其特征量.....	1
第二节 电力设备绝缘预防性试验.....	2
第三节 电力设备绝缘在线检测与诊断.....	4
第二章 电力电容器检测与诊断	6
第一节 电力电容器结构特征.....	6
第二节 电力电容器预防性试验技术.....	7
第三节 电力电容器在线检测与诊断技术	11
第三章 绝缘子和套管检测与诊断	18
第一节 绝缘子和套管绝缘结构特性	18
第二节 绝缘子和套管预防性试验技术	20
第三节 绝缘子和套管在线检测与诊断技术	26
第四章 避雷器检测与诊断	32
第一节 避雷器结构特征	32
第二节 避雷器预防性试验技术	34
第三节 避雷器在线检测与诊断技术	39
第五章 高压断路器检测与诊断	45
第一节 高压断路器结构特征	45
第二节 高压断路器预防性试验技术	48
第三节 高压断路器在线检测与诊断技术	52
第六章 GIS 检测与诊断	54
第一节 GIS 绝缘结构特性	54
第二节 GIS 预防性试验技术	56
第三节 GIS 在线检测与诊断技术	59

第七章 电力电缆检测与诊断	65
第一节 电力电缆绝缘结构特性	65
第二节 电力电缆预防性试验项目及技术	66
第三节 电力电缆在线检测技术	72
第八章 电力变压器检测与诊断	80
第一节 电力变压器绝缘结构特性	80
第二节 电力变压器预防性试验技术	83
第三节 电力变压器在线检测与诊断技术	100
第九章 发电机检测与诊断	106
第一节 发电机绝缘结构特性	106
第二节 发电机预防性试验技术	109
第三节 发电机在线检测与诊断技术	117
第十章 电力设备检测与诊断技术的发展	130
第一节 现代传感技术在电力设备检测中的应用	130
第二节 信号处理技术在电力设备诊断中的应用	140
第三节 电力设备综合诊断与寿命评估	153
参考文献	166

第一章

概 述

从普遍意义上来讲,电力设备是由导电材料、导磁材料、结构材料和绝缘材料组成。常用的导电材料有铜、铝;常用的导磁材料有硅钢片等;常用的结构材料有铸铁、钢板等;这三类均属于金属材料。电力设备中另一类材料是绝缘材料。组成电力设备绝缘系统的材料可以是固体、液体和气体,如发电机的环氧-云母复合绝缘、电缆的塑料绝缘(交联聚乙烯、聚氯乙烯、氟塑料等)、绝缘子与套管的绝缘(电瓷、玻璃、环氧玻璃纤维硅橡胶)、变压器中的油绝缘、充油电缆中的油绝缘、GIS(气体绝缘系统或气体绝缘变电站)中的 SF_6 或 SF_6 混合气体绝缘等等。在实际运行中,绝缘结构的电气和机械性能往往决定着整个电力设备的寿命,绝缘材料品质的下降(即通常所说的绝缘劣化)将导致电力设备的损坏。统计表明,电力设备运行中60%~80%的事故是由绝缘故障导致的,所以研究电力设备绝缘检测与诊断技术,对提高电力设备运行可靠性具有极其重要的意义。

第一节 电力设备绝缘老化及其特征量

电力设备在制造、运输、安装和运行过程中不可避免地会产生绝缘缺陷,特别是在长期运行过程中,电力设备受到电场、热场、机械应力、化学腐蚀以及环境条件等的影响,电力设备绝缘的品质逐渐劣化,可能导致绝缘系统的破坏。

绝缘系统中的绝缘缺陷通常可以分成两大类:一类是集中性缺陷,指缺陷集中于绝缘的某一个或某几个部分,例如局部受潮、局部机械损伤、绝缘内部气泡、瓷介质裂纹等。它又可分为贯穿性缺陷和非贯穿性缺陷,这类缺陷的发展速度较快,因而具有较大的危险性。另一类是分布性缺陷,指由于受潮、过热、动力负荷及长时间过电压的作用导致的电气设备整体绝缘性能下降,例如绝缘整体受潮、充油设备的油变质等,它是一种普遍性的劣化,是缓慢演变而发展的。绝缘内部有了上述这两类缺陷后,它的特性就要发生一定的变化。

绝缘材料和结构在运行中产生的特性劣化,有的是可逆的,有的是不可逆的。对于绝缘系统在运行中出现的诸如受潮等情况而导致绝缘性能下降,经过处理可以恢复原有特性的,就是一种可逆的劣化;而绝缘系统在各种因素的长期作用下发生一系列的化学、物理变化,导致绝缘性能和机械性能等不断下降,则产生了一种不可逆的变化,将最终导致电力设备绝缘击穿,这种变化过程即为老化。

电力设备绝缘老化是在一定的外界因素的作用下产生的，这些外界因素（如电、热、机械应力、环境因素等）常称为老化因子。运行过程中，在多因子的综合作用下电力设备绝缘系统产生老化，其作用过程极其复杂。目前国内外对单一因子作用下的老化规律有较多的研究，而对多因子顺序作用和同时作用的老化机理研究较少，从而也制约了电力设备绝缘检测水平的提高。

电老化是指在电场长期作用下电力设备绝缘系统中发生的老化。电老化机理很复杂，它包含放电引起的一系列物理和化学效应。随着外施电压的增加，绝缘系统中的放电加强，放电量和放电重复率均增加，导致电老化速度加快，绝缘寿命降低。热老化是指在热的长期作用下电力设备绝缘系统中发生的老化。有机绝缘材料在热的作用下发生热降解，导致绝缘材料的结构变化，使其电气性能和机械性能劣化。随着温度的上升，绝缘的热老化速度迅速增加，不同的绝缘材料受温度的影响程度不一样，在室温下绝缘材料的老化极其缓慢。机械老化是指固体绝缘系统在运行过程中受到各种机械应力的作用发生的老化。机械老化过程是绝缘材料在机械应力的作用下微观缺陷发生规则运动，形成微裂缝并逐渐扩大而导致的。机械应力产生的微裂缝在强电场作用下将引发局部放电，从而加速绝缘系统的破坏。环境老化是指在水分、氧气、阳光辐射、化学尘埃等自然环境条件下和在海拔地理条件下导致的绝缘系统表面老化，特别是当有机高聚物表面沉积污秽物后，在水和强电场的作用下将产生强烈的污秽放电，导致绝缘表面产生破坏。

表征不同绝缘系统劣化程度有不同特征量。绝缘特征量分两类：一类是直接表征绝缘剩余寿命的特征量，如耐电强度、机械强度；另一类是间接表征绝缘剩余寿命的特征量，如绝缘电阻、介质损耗角正切、泄漏电流、局部放电量、油中气体含量、油中微水含量等等。直接特征量是通过破坏性试验方法得到的，而间接特征量可以通过非破坏性试验得到。随着对不同老化因子作用规律研究的深入，提出了一些新的表征绝缘品质的特征量，如第二电流激增点、直流分量、超高频放电频谱、超声振动特性等等。

绝缘老化是时间和老化因子的函数，绝缘老化的程度要根据其性能的变化来确定。当绝缘性能指标达到某些极限值时，绝缘已不能在工作电压下正常使用，其寿命达到使用极限，这些性能指标称为阈值或判据。绝缘检测就是通过各种不同的方法检测电力设备的现有绝缘性能，即通过一些试验，测量表征绝缘性能的有关参数，把隐藏的缺陷检查出来。目前，电力运行部门和电力试验研究部门，对于运行中的电力设备常采用定期检测和在线监测的方法，来判定绝缘系统的当前性能。

第二节 电力设备绝缘预防性试验

为了确保电力设备的安全运行，电力设备在制造和运行过程中均需要进行严格的检测。电力设备在制造过程中的检测主要分：型式试验、例行试验和出厂试验；电力设备在运行前和运行中的检测主要有：交接试验、预防性试验和在线监测。通过试验，掌握电气设备绝缘的情况，可保证产品质量或及早发现缺陷，从而进行相应的维护与检修，以保证设备的正常运行。

电力设备在运行中进行预防性试验，可及时发现缺陷，减少事故的发生，它已成为我国电力生产中的一重要制度。预防性试验可分为非破坏性试验和破坏性试验两大类。

(1) 非破坏性试验又称绝缘特性试验，是指在较低的电压下或是用其他不会损伤绝缘的办法来测量绝缘的各种特性，从而判断绝缘内部有无缺陷。常见的试验项目有绝缘电阻测量、泄漏电流测量、介质损耗角正切测量、油中气体含量检测等项目。由于这类试验施加的电压较低或不需施加电压，故不会损伤设备的绝缘性能，其目的是判断绝缘状态，及时发现可能的劣化现象。实践证明这类方法是有效的，但目前还不能仅依据它们来可靠地判断设备的绝缘状态。

(2) 破坏性试验又称绝缘耐压试验，是指在高于工作电压下所进行的试验。试验时在设备绝缘上施加规定的试验电压，考验绝缘对此电压的耐受能力。它主要指交流耐压和直流耐压试验。由于这类试验所加电压较高，考验比较直接和严格，特别是能揭露那些危险性较大的集中性缺陷，因此能保证绝缘有一定的水平或裕度，缺点是可能会在耐压试验时给绝缘造成一定的损伤。耐压试验在非破坏性试验之后才进行，如果非破坏性试验已表明绝缘存在不正常情况，则必须在查明原因并加以消除后再进行耐压试验，以避免不应有的击穿。

我国 1996 年对《电力设备预防性试验规程》（本书中以下简称《规程》）进行了修订，常见的电力设备预防性试验主要项目见表 1-1。

表 1-1 现行电力设备预防性试验主要项目

	发电机	电力变压器	电力电缆	高压套管	断路器	
					充 SF ₆	充油
绝缘电阻测量	☆	☆	☆	☆	☆	☆
直流泄漏电流测量	☆	☆	☆	×	☆	☆
介质损耗角正切值测量	△	☆	☆	☆	△	☆
绝缘油试验	☆	☆	☆	○	×	☆
微量水分测定	×	☆	×	○	☆	×
油中溶解气体色谱分析	×	☆	×	○	×	×
局部放电试验	×	×	×	○	×	×
直流耐压试验	☆	×	☆	×	×	×
交流耐压试验	△	△	×	△	△	☆

注 “☆”表示正常试验项目，“×”表示不进行该项试验，“△”表示大修后进行，“○”表示必要时进行。

预防性试验是一种简便且较有效地评估电力设备绝缘状况的方法。根据过去长期的运行经验及试验研究中已逐步确立起来的这些预防性试验项目，为确保电气设备的安全运行发挥着很大作用。

现行的预防性试验方法是前人多年工作的结晶，它对电力设备的安全运行发挥着积极作用。但是近年来愈来愈多的电力工作者从实践中意识到，常规预防性试验存在着试验时需要停电、试验时间集中工作量大、试验是否有效的问题，特别在电力设备运行过程中，

人们最关心的是绝缘结构的剩余电气强度,但至今还未找到它与绝缘电阻、泄漏电流及介质损耗角正切等非破坏性试验参数之间的直接函数关系,所以仅凭这些试验项目难以准确、有效地判断电力设备绝缘的好坏,也不能确保下一运行周期安全运行,有的试验项目试验后还会留有后遗症,这就暴露出常规的停电预防性试验本身存在着缺陷。

为了提高电力设备绝缘试验的准确性和有效性,近年来对电力设备的预防性试验方法进行了必要地修正,一方面提出了一些新的预防性试验项目,如色谱分析、局部放电试验等,使检测的有效性明显提高;另一方面对原有的试验技术进行修正,如“分解试验”(即在可能的情况下,将大型电力设备分解成若干部分进行试验),并起到了一定的效果。

第三节 电力设备绝缘在线检测与诊断

常规的预防性试验一般以一年为一周期,电力设备虽然都按规定、按时做了常规预防性试验,但事故仍然时有发生,主要原因之一是由于现有的试验项目和方法往往难以保证在这一个周期内不发生故障。由于绝大多数故障事前都有先兆,这就要求发展一种连续或选时的监测技术,在线监测就是在这种情况下产生的。电力设备在线检测技术是一种利用运行电压来对高压设备绝缘状况进行试验的方法,它可以大大提高试验的真实性与灵敏度,及时发现绝缘缺陷。采用在线检测的方法可以根据设备绝缘状况的好坏来选择不同的检测周期,使试验的有效程度明显提高。在线检测可以积累大量的数据。将被试设备的当前试验数据(包括停电及带电监测)和以往的检测数据相结合,用各种数值分析方法进行及时、全面地综合分析判断,就可以发现和捕捉早期缺陷、确保安全运行,从而减小由于预防性试验间隔所带来的误差。

通常,一种电力设备的在线监测仪器或系统,由传感器系统、信号采集系统、分析诊断系统组成。传感器系统用于感知所需要的电气参量或非电气参量,目前常用的传感器有电磁传感器、力学量传感器、声参数传感器、热参数传感器、化学量传感器等;信号采集系统是将传感器得到的模拟量转换成数字量进行传输,应用数字滤波技术对采集到的信号进行滤波处理,抑制和消除外界干扰和背景噪声,提取真实信号,并进行信号的还原,光电转换和光纤传输的引入有效地解决了高压隔离的问题;分析诊断系统利用小波分析技术、神经网络技术、模糊诊断技术、专家分析技术等方法对所采集信号进行分析、处理和诊断,得到所测电力设备绝缘的当前状况,并根据需要进行绝缘诊断和寿命评估。

对运行中的电力设备实施在线检测具有相当的难度。首先是尚无统一的标准。各研究单位、各仪器制造商开发的在线检测仪所采用的检测方法、检测参量、判定标准均不相同,导致不同在线检测装置之间不具有可比性。其次是对电力设备绝缘特征量研究不够。现普遍采用检测绝缘电阻、泄漏电流、局部放电等传统检测量,且各检测量与绝缘剩余寿命的关系也没有明确的数值关系。再次在线检测时干扰抑制十分困难,运行环境下存在的各种干扰直接影响检测结果的正确性。目前采用了硬件滤波、数字滤波等许多方法,起到了一定效果。

在线检测的推广还有利于从定期维修制过渡到更合理的状态维修制。按事先制订的检

修周期按期进行停机检修，虽对提高设备可靠性起了一定作用，但由于未考虑设备的具体状况，且制订的周期往往比较保守，以致于出现了过多不必要的停机及维修，甚至因拆卸、组装过多而出现过早损坏。我国目前执行的大多是定期维修制，一般都要求“到期必修”，没有充分考虑设备实际状态如何，以致超量维修，造成了人力及物力的大量浪费。状态维修的基础就在于绝缘检测及诊断技术，既要通过各种检测手段来正确诊断被试设备的目前状况，又要根据其本身特点及变化趋势等来确定能否继续运行或停电检修。

电力设备的状态监测按其监测的作用可分为保护性监测和维护性监测两类。保护性监测也就是故障监测，通过对常规运行参数（如电流、电压、功率、温度、流量、压力等）的监测，提供电力设备的正常运行工况。同时，还在故障敏感的部件设置一些专用监测器，通过对反应异常现象的特征量的监测，帮助运行人员及时了解这些部件的状态，在故障发生之前发出报警，以便采取必要的措施，避免严重事故的发生。维护性监测是通过在线监测、离线检查和试验，发现缺陷、监视缺陷的发展趋势并预测发展的后果，以指导制订维修策略。维护性监测需要在运行和停机时完成一系列的周期性或连续试验，当发现有异常现象时，进行原因分析和适当维护，以消除异常现象的根源。目前世界各国普遍认为电气设备应当从定期的预防性维修逐步过渡到根据其状态进行的预测性维修。

近年来，随着传感器技术、信号采集技术、数字分析技术与计算机技术的发展和应 用，在线监测技术得到了飞速发展。在线检测将成为绝缘检测中的一个重要组成部分，它将在很多方面弥补仅靠定期停电预防性试验的不足之处，但目前还不能认为在线检测将全面替代停电预防性试验。这主要由于一方面在线检测理论和技术尚不完善，绝缘劣化的特征量是什么、如何在现场条件下准确检测、判定标准是什么等问题均没有很好的解决，必须开展进一步的研究；另一方面，在线检测测量的是工频电压下的电力设备绝缘参数，电力系统内时常发生的过电压情况下的绝缘品质无法进行测量。

电力电容器检测与诊断

电力电容器在电力系统中起功率补偿和过电压保护等作用,电力电容器按其用途可分为高压并联电容器、串联电容器、耦合电容器、脉冲电容器、直流电容器、断路器均压并联电容器、滤波电容器、防护电容器和标准电容器等类型。另外,还有一些以电力电容器为基础,发展而成的成套装置,如电容式电压互感器、并联补偿装置、串联补偿装置、冲击电压和冲击电流发生装置。并联电容器又称移相电容器,是用途最广、生产量最大、最基本的一种电力电容器,它广泛用于提高电力设备或系统的功率因数;均压并联电容器主要用于断路器断口的均压及增加断流容量;耦合电容器主要用于电力系统载波通信、高频保护、电气测量、抽取电能装置部件等。并联电容器和耦合电容器直接接在高压输电线与地之间,长期承受工频电压,并且必须能承受高压线路上发生的过电压作用。

第一节 电力电容器结构特征

电力电容器主要由三部分组成:电容器极板、介质材料和外壳。电容器极板是导电良好的金属材料,电容器的外壳有金属外壳和绝缘外壳两种,绝缘外壳最常见的是电瓷外壳。

电力电容器极板之间的介质材料,同时起着储藏能量和绝缘的双重作用,所以要求单位体积(或单位质量)所储藏的能量要大,并且要求损耗小、寿命长、工艺性能好。常用的介质材料有三类。

(1) 固体介质。固体介质是电容器的主要介质材料,用于电容器的固体介质要求导电微粒和弱点很少、耐电强度高、介电常数大、介质损耗小,且易于加工成厚度均匀的薄膜,易卷绕、浸渍性能好,目前常用的固体介质主要是电容器纸和塑料薄膜。电容器纸在常温下化学稳定性很好,但温度在 120°C 以上会明显氧化,温度达到 $150\sim 160^{\circ}\text{C}$ 时即很快分解。塑料薄膜的特点是机械强度、耐电强度和绝缘电阻都很高,中性和弱极性薄膜的 $\tan\delta$ 很小, ϵ_r 及 $\tan\delta$ 几乎与频率无关,电容器塑料薄膜的耐热性往往比电容器纸高,薄膜的主要缺点是难以浸渍。

(2) 液体介质。液体介质在电力电容器中用作浸渍剂,以填充固体介质中的空隙,从而提高介质的耐电强度,改善局部放电特性和散热条件等。常用的液体介质有:电容器油、烷基苯、二芳基乙烷、酯类浸渍剂等。电容器油是最常用的液体介质,环烷烃和烷烃类电容器油的化学稳定性和热老化性能较好,芳香烃类电容器油的电老化性能较好,但总

体上电容器油的耐热性和电老化性能都较差，工作温度不超过 80℃，特别是在高电场及过电压作用下容易分解并析出气体，当电容器击穿时可能引起爆炸和燃烧。

(3) 金属化纸和金属化薄膜。它们是在纸或薄膜表面蒸发上一层 30~50nm 的金属层做电极，其特点是具有自愈性，即当金属化纸或金属化薄膜的某处击穿时，极板之间产生短路电流，使击穿部位周围的金属层熔化并蒸发，从而恢复极板间介质的绝缘性能，而使电容器有较高的可靠性。在电力电容器设计中常采用组合介质结构，例如浸渍纸、浸渍薄膜、浸渍纸与薄膜的复合介质。组合介质的电气性能受介质材料的成分、工作温度、电场强度、频率、压力、制造工艺等的影响。

对于平板电容器，忽略边缘效应时，其电容量为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

式中： ϵ_0 为真空的介电常数 ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$)； ϵ_r 为极间介质的介电常数； A 为极板面积 (m^2)； C 为电容量 (F)； d 为极间介质厚度 (m)。

电力电容器通常用铝箔作极板，采用卷绕式扁平形元件，如图 2-1 所示。在这种结构中，材料利用率高、体积小，每个极板 (图 2-1 中的 A 和 B) 双面起作用，其电容值约等于该元件展开成平面长条时的 2 倍，即

$$C = 2 \times 8.85 \times 10^{-12} \times \frac{\epsilon_r b l}{d}$$

式中： b 为铝箔极板宽度 (m)； l 为铝箔极板长度 (m)； C 为电容量 (F)； d 为元件极板间介质厚度 (m)。

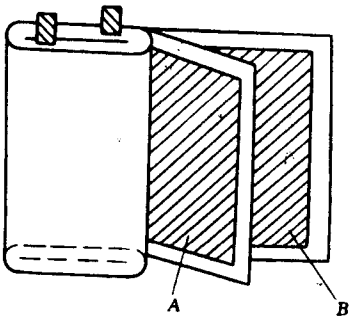


图 2-1 卷绕式平板电容元件结构示意图

当电容器的几何尺寸 b 、 l 和 d 一定时，电容 C 与介质的介电常数 ϵ_r 成正比。因此，为了使电容器做到容量大，而尺寸小、重量轻，采用高介电系数的介质是很重要的一个方面。

第二节 电力电容器预防性试验技术

电力电容器的预防性试验项目见表 2-1。

表 2-1 电力电容器主要预防性试验项目

	并联电容器、串联电容器 交流滤波电容器	耦合电容器 电容分压器	断路器电容器	集合式电容器
电容值测量	☆	☆	☆	☆
两极板间绝缘电阻	×	☆	☆	×
$\tan\delta$ 测量	×	☆	☆	×
两极对外壳的绝缘电阻	☆	×	×	☆
低压端对地绝缘电阻	×	☆	×	×

续表

	并联电容器、串联电容器 交流滤波电容器	耦合电容器 电容分压器	断路器电容器	集合式电容器
套管对地绝缘电阻	×	☆	×	×
局部放电试验	×	○	×	×
交流耐压试验	×	○	×	○
并联电阻值测量	☆	×	×	×
渗漏油检查	☆	×	☆	☆
绝缘油击穿试验	×	×	×	☆

注 “☆”表示正常试验项目，“×”表示不进行该项试验，“○”表示必要时进行。

由于电容器年损坏率与时间的关系曲线是一条浴盆曲线，投运后的两年早期损坏率一般高一些，以后 10~15 年时间内年损坏率较低，且变化不大，再往后年损坏率又要升高。因此《规程》规定投运后的第一年内就要进行预防性试验。以后的试验周期是 1~5 年。投运 10~15 年后，由于损坏率上升，就应该适当缩短预防性试验周期。

一、电容值和介质损耗角正切 $\tan\delta$ 测量

测量电容值和介质损耗角正切 $\tan\delta$ 的目的是检查其电容器绝缘介质的变化情况，据此可以判断内部接线是否正确、绝缘是否受潮或存在某些局部缺陷等。测量电容值和 $\tan\delta$ 通常可用平衡电桥法（QS1、QS3 型西林电桥）或不平衡电桥法（M 型介质试验器）进行测量，也可以采用瓦特表法和电压电流表法等。

《规程》和《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》（GB50150—91）（以下简称《交接标准》）中给出了介质损耗角正切 $\tan\delta$ 值的规定值（见表 2-2），但必须着重与该设备历年的 $\tan\delta$ 值相比较，并和处于同样运行条件下的同类设备相比较， $\tan\delta$ 突然明显增大，即使 $\tan\delta$ 值未超过标准，也应该引起注意，并查明原因。《规程》中规定所测得的电容值偏差不超过额定值的 +10% 或 -5%，电容值偏差超过出厂值的 +2% 时应缩短试验周期，一相中任两节实测电容值之差不得超过 5%。

表 2-2 在 10kV 试验电压下介质
损耗角正切的规定值

	耦合电容器	断路器电容器
油纸绝缘	0.005	0.005
膜纸复合绝缘	0.002	0.0025

电力电容器的 $\tan\delta$ 和电容器内部介质的种类、厚度、浸渍剂的特性、温度的变化以及电容器制造工艺水平有很大关系，在制造厂出厂试验时要进行 $\tan\delta$ 的测量，但预防性试验则通常不测量 $\tan\delta$ 。

对于耦合电容器，由于其电容量较小且两极对地绝缘，通常采用 QS1 型西林电桥正接线法进行测量。对于并联电容器，由于其电容量较大，所以常用电压电流表法和双电压表法进行测量。

1. 电压电流表法

电压电流表法的原理接线如图 2-2 所示。当外加的

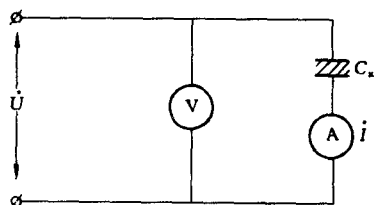


图 2-2 电压电流表法测量原理图

交流电压为 $\dot{U}$ ，流过被试电容器的电流为 $\dot{I}$ 时，则

$$I = \omega U C_x$$

故

$$C_x = \frac{I}{\omega U} \quad (\text{F})$$

或

$$C_x = \frac{I}{\omega U} \times 10^6 \quad (\mu\text{F})$$

式中： I 为电流表所测的电流 (A)； U 为外加电压 (V)，由电压表测量。

现场电源的电压一般为 220V 或 380V，电压可以通过自耦变压器进行调节，可以将电压调至 159.2V 或 318.4V，从而简化计算公式（电流的单位为 mA）

$$\text{当测试电压为 } 159.2\text{V 时, } C_x = \frac{I}{\omega U} = \frac{I \times 10^{-3}}{314 \times 159.2} = 0.02I \quad (\mu\text{F})$$

$$\text{当测试电压为 } 318.4\text{V 时, } C_x = \frac{I}{\omega U} = \frac{I \times 10^{-3}}{314 \times 318.4} = 0.01I \quad (\mu\text{F})$$

2. 双电压表法

双电压表的原理接线及相量图如图 2-3 所示。根据相量关系可推导出这时的计算公式

$$U_2^2 = U_1^2 + U_C^2 = U_1^2 + \frac{I_C^2}{(\omega C_x)^2} = U_1^2 + \frac{\left(\frac{U_1}{R_1}\right)^2}{(\omega C_x)^2} = U_1^2 \left[1 + \frac{1}{(R_1 \omega C_x)^2} \right]$$

从而可以得到

$$C_x = \frac{1}{\omega R_1 \sqrt{\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 - 1}} \quad (\text{F}) \quad \text{或} \quad C_x = \frac{10^6}{\omega R_1 \sqrt{\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 - 1}} \quad (\mu\text{F})$$

式中： R_1 为电压表 V1 的内阻。

利用现行的判别标准进行性能判别时需特别注意，例如：一台耦合电容器是由 100 个左右的电容元件串联后组成，如允许其电容量变化 +10%，就意味着 100 个元件中若有 10 个以下元件发生短路损坏，其电容量还在允许范围之内，而这时投入运行则另外的 90 个左右元件电容要承担较高的运行电压，这对运行中的耦合电容器的绝缘会造成极大的危害，并可能导致爆炸事故，所以应该要将现在的测量结果与历史记录和同样运行条件下的同类设备进行比较，以防误诊断。

在现场进行 $\tan \delta$ 测量时，仪器会受到现场电磁干扰，严重时会产生较大的误差，甚至无法测量。测量中可以通过转换检流计的极性开关，分别调节电桥达到平衡，然后求取两次的平均值，消除磁场的干扰；消除电场的干扰可以采取提高试验电压、尽量采用正接线法接线、在被测试品上加屏蔽罩以及选取电源相位、改变电源相位等方法使所加电压与干扰电压同相或反相来消除干扰。

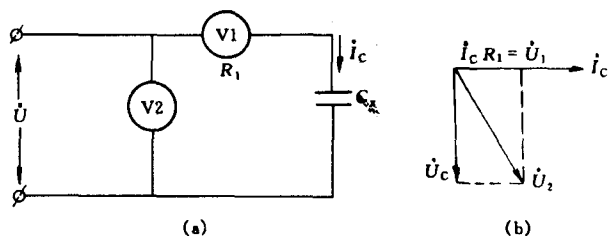


图 2-3 双电压表法测量原理图

(a) 原理接线图；(b) 相量图

在测量时应注意下列因素的影响：

(1) 温度的影响。温度对 $\tan\delta$ 测量影响较大， $\tan\delta$ 随着温度的升高而增高，且与绝缘结构和绝缘状况有关，应尽量选择在相近的温度条件下测量 $\tan\delta$ 。

(2) 频率的影响。随着频率的增加 $\tan\delta$ 将出现一个峰值，这是由于内部极化损耗引起的。

(3) 电压的影响。在正常良好的绝缘情况下， $\tan\delta$ 一般不随电压变化（或略有变化），而当绝缘有明显缺陷时， $\tan\delta$ 随电压的变化则很明显，这时需认真分析原因。

用以上方法测量时，很容易根据测量结果计算出单相电容器的电容量，但对于三相电容器，则需要考虑不同接线方式的影响。表 2-3 和表 2-4 分别给出了三角形或星形接线的三相电容器电容（每相电容分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 ）的测量方法和计算公式。

表 2-3 三相三角形接线的电容器电容量的测量和计算公式

测量次数	短路接线端	测量接线端	测量电容量	电容量计算
1	2、3	1 与 2、3	$C_A = C_1 + C_3$	$C_1 = \frac{C_A + C_C - C_B}{2}$
2	1、2	3 与 1、2	$C_B = C_2 + C_3$	$C_2 = \frac{C_B + C_C - C_A}{2}$
3	1、3	2 与 1、3	$C_C = C_1 + C_2$	$C_3 = \frac{C_A + C_B - C_C}{2}$

表 2-4 三相星形接线电容器电容量的测量和计算公式

测量次数	测量接线端	计算方程式	电容量计算
1	1 与 2	$\frac{1}{C_{12}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$	$C_1 = \frac{2C_{12}C_{31}C_{23}}{C_{31}C_{23} + C_{12}C_{23} - C_{12}C_{31}}$
2	3 与 1	$\frac{1}{C_{31}} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_1}$	$C_2 = \frac{2C_{12}C_{31}C_{23}}{C_{31}C_{23} + C_{12}C_{31} - C_{12}C_{23}}$
3	2 与 3	$\frac{1}{C_{23}} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$	$C_3 = \frac{2C_{12}C_{31}C_{23}}{C_{12}C_{31} + C_{12}C_{23} - C_{31}C_{23}}$

二、绝缘电阻测量

测量两极间或两极对外壳的绝缘电阻的主要目的是初步判断电容器相应部位的绝缘状况，测量时采用 2500V 兆欧表，测量接线如图 2-4 所示。

测量结果采用比较法进行分析、判断。绝缘电阻的判断标准是：耦合电容器极间绝缘电阻一般不小于 5000MΩ。小套管对地绝缘电阻不小于 1000MΩ，并联电容器极对壳绝缘电阻不小于 2000MΩ。

测量时应注意的问题是：

(1) 在测量前后均应对电容器放电，放电时间约为 2~5min。

(2) 在测量过程中，在未断开手摇式兆欧表引出线前，不得停止摇动手柄，以免损坏兆欧表。

(3) 对电容量较大的电容器，可借放电来粗略地判断电容器是否良好，如果放电的火花和响声都很小，则可能内部绝缘有显著老化或受潮。

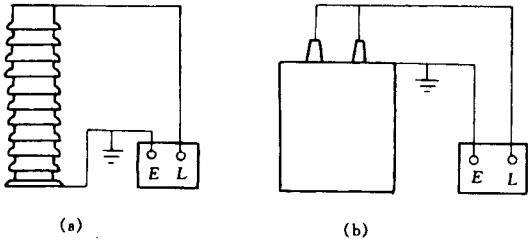


图 2-4 绝缘电阻测量接线图

(a) 耦合电容器；(b) 并联电容器