

新电工技术系列

电力设备的 绝缘诊断

〔日〕速水敏幸 著



科学出版社

www.sciencep.com

新电工技术系列

电力设备的绝缘诊断

〔日〕速水敏幸 著
刘晓萱 译
王友功 校

科学出版社

北 京

图字:01-2002-1669 号

Original Japanese language edition

Denki Setsubi no Zetsuen Shindan

By Toshiyuki Hayami

Copyright © 2001 by Toshiyuki Hayami

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under licence from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2002

All rights reserved

電気設備の絶縁診断

速水敏幸 オーム社 2001

图书在版编目(CIP)数据

电力设备的绝缘诊断/(日)速水敏幸著;刘晓萱译;王友功校. —北京:科学出版社,2003

(新电工技术系列)

ISBN 7-03-010671-7

I. 电… II. ①速…②刘…③王… III. ①电力系统—电气设备—电气绝缘—故障诊断 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 057793 号

责任编辑 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 刘士平 封面设计 李 力

科 学 出 版 社 出 版

<http://www.sciencep.com>

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

源海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003 年 6 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2003 年 6 月第一次印刷 印张: 5 3/4

印数: 1—5 000 字数: 148 000

定 价: 15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

中译本序

很高兴向国内读者推荐速水敏幸教授的新书《电力设备的绝缘诊断》。

一是其选题及内容对中国也非常合适:我国电力工业这些年来虽以当今世界最快的速度在增长,但仍难以满足经济迅猛发展以及人民生活水平提高的需要。为此,一方面要继续发展电力工业,如正在城网、农网改造中有更大的投入等;另一方面要努力提高已安装设备的运行可靠性,充分发挥其潜力。例如许多单位正逐步开展的状态检测、状态维修;因为只有及时、准确地掌握设备的真实状况,才能用好、管好设备,确保设备及系统的运行可靠性及经济性。该书正是以此为切入点,阐述了常用电力设备的检测及诊断技术,且在第1章里分析了所用的绝缘材料及其老化规律。最后还介绍了日本近年来处理电力设备环保问题的有关经验,这对我国读者也是很有参考价值的。

二是该书内容充实、材料新颖,特别是实用性强,这正因为速水博士几十年来长期从事本领域的研究及教学工作,例如他曾在住友公司长期从事开发研究等工作,出版过《交联电缆》等专著;后在宇部工专、武藏工大等任教,并担任有关绝缘材料及老化评定调查专委会的委员长等职,主编过“绝缘材料的老化及电力设备、电缆的绝缘老化评定的调查”(电气学会技术报告 No. 752)。因此,本书不仅有基础部分,还有许多最新成果,特别是在交联聚乙烯电缆方面。

在2000年国际介质材料及应用会议(ICPADM)和2001

年亚洲绝缘诊断会议(ACEID)上就得悉速水教授将编出此书,如今已能见到中译本,这还得感谢 OHM 社及科学出版社的合作,感谢译者的辛勤劳动,才使国内同行能很快见到该书的中译本。

西安交通大学 严 璋教授

2003 年 1 月

前 言

本书内容以在电力设备的设计和管理维护方面工作的众多技术人员为对象。因电力设备发生事故而造成停电的经济损失是十分巨大的,所以绝缘诊断就显得尤为重要。

绝缘诊断作为防止停电事故的一种手段,目的是对各种各样电力设备绝缘体的老化状态进行检测。举例来说,这就相当于对人们身体的异常状态进行的事前健康诊断。

大多数电力设备原本是按照几十年的寿命设计、制造的,但并不是所有的设备都能达到其设计寿命,存在着造成突然绝缘的多种因素。那些突发的绝缘与停电密切相关。

此外,在日本高速成长时期配置的各种电力设备至今已运行了 30 多年,应该更新的日期越来越近。但是,要进行设备更新需要新的设备投资,在目前的社会经济条件下,哪一个企业都不会轻易地更新设备。所以希望电力设备能尽量用到其设计的使用期限的要求十分强烈。

另一方面,电气学会应各方面的要求,在从 1980 年至今的 20 年间,陆续设置了有关绝缘诊断技术的专门调查委员会。作者本人就曾担任过这个专门调查委员会的委员、干事、委员长等职务。并且,在住友电气工业股份公司对交联电缆进行了多年研究(速水:《交联电缆》,コ口十社,1986 年)。

作者在从事这一工作的最后 5 年间,专门从事对电缆等进行绝缘诊断的现场试验工作。

现场试验的工作是在严酷的现场作业条件下进行的,在

精神上体力上都经历了非常艰苦的体验。但是,在这些工作中也获得了大量的宝贵数据。详细分析这些数据,并采用直流漏电流和在线绝缘诊断(直流叠加法)的方法,终于揭示了决定交联电缆寿命的贯穿水树枝现象的产生机理。

是这些宝贵的经验和在专门调查委员会工作中的积累,成就了这本书。

本书第1章阐述电力设备绝缘材料老化问题的基础内容。构成电力设备的绝缘材料有固体、液体、气体、复合材料等。老化原因可以分为伴随局部放电的电老化与由机械、热而引起的物理老化等两大类。另外还有与局部放电无关的水树枝等特殊老化现象。本章将首先阐述这些老化现象。

第2章介绍有关旋转电机(发电机、电动机)、变压器、电力电缆、电容器等具有代表性的电力设备的绝缘诊断方法。对于每一种电力设备,都有多种绝缘诊断方法,本书将对现有的而且经常使用的测量方法各用于何种老化的诊断,能够检测到什么样结果进行说明。

第3章叙述电力设备与环境问题的关系。由于近年来科学技术的不断发展,人们的物质生活变得更加富裕起来。但同时,也产生了很多公害。电力设备中也用到了在燃烧时会产生二噁英的PVC等有机高分子材料。另外,电容器和变压器的绝缘油中也含有对人体有不良影响的多氯联苯(PCB)。而作为制冷剂的氟里昂则破坏了地球上空的臭氧层。本章将讨论上述有关现象,以及正在不断进步的处理方法。

最后,借本书出版之际,作者对允许使用作者在电气学会〈绝缘材料的老化及电力设备、电缆的绝缘老化评定调查专门委员会〉担任委员长期间收集的参考资料,对委员会的伊藤泰郎干事(武藏工业大学)、梅本公一干事(东芝)、内田

克己助理干事(中部电力),以及其他各位委员表示感谢。而且,对于个别设备的调查,还得到了下面各位先生的帮助,在这里也一并表示感谢。

发电机:神谷宏之(日立制作所);变压器:宫本昌广(富士电机);电容器:菅沼纪美夫(日新电机);管道电缆:荒木智勇(住友电工);企业的绝缘诊断:江藤计介(出光石油化学);冈本涉(丰田);环境问题:山崎友纪(大阪府立高专),东川善文(住友电工)(敬称略)。

如果本书对从事电力设备管理的众多技术人员能有所帮助,将是作者最大的荣幸。

速水敏幸

2001年8月

著者简历

速水敏幸

1954 年 大阪工业大学专业学院电气工学专业毕业。

进入住友电气工业(株)

1979 年 获工学博士

1993 年 宇部工业高等专科学校电气工学专业主任教授

现 在 武藏工业大学电气电子工学部客座教授

主要著作 《CV 电缆》CORONA 社(1986 年)

《电线上的麻雀为什么不会触电》讲谈社 BLUEBACKS(1991 年)

《迷与雷的科学》讲谈社 BLUEBACKS(1996 年)

本书著作权和专有出版权受到《中华人民共和国著作权法》的保护。凡对本书的一部分或全部进行转载、或用复印机进行复制或在其场合引用、以及录入电子设备等行为,均属侵害著作权,构成违法。

本书如需复制、引用、转载、改编时,必须得到版权所有者的许可。

如有任何疑问请与以下部门联系。联系时请尽量使用信函或传真形式。

科学出版社总编部

电话:010-64012994 传真:010-64019810

读者服务部:010-64017892 010-64000246

邮政编码:100717 地址:北京市东黄城根北街 16 号

<http://www.sciencep.com>

北京东方科龙图文有限公司

电话:010-82857401 82843276 传真:010-82842304

邮政编码:100029 地址:北京市朝阳区华严北里 11 号楼 3 层

<http://www.okbook.com.cn>

目 录

第 1 章 绝缘材料的老化

1.1 电力设备的绝缘结构由电极和电介质组成	1
1.2 电力设备的绝缘材料	4
1.2.1 电机(或发电机、电动机)	6
1.2.2 油浸绝缘	7
1.2.3 CV 电缆	13
1.2.4 气体绝缘设备	22
1.3 绝缘老化	27
1.3.1 热老化与机械老化	27
1.3.2 电压老化	34
参考文献	61

第 2 章 电力设备、电缆的绝缘诊断

2.1 旋转电机	66
2.1.1 机械老化与热老化的诊断	66
2.1.2 常用绝缘诊断技术	67
2.1.3 根据运行经历进行寿命推定(NY 图法)	74
2.1.4 最大放电电荷与剩余击穿电压	76
2.1.5 其他的绝缘诊断方法	77
2.1.6 运行中的绝缘诊断	77

2.1.7	旋转电机所必须保持的最低击穿电压	78
2.2	变压器	78
2.2.1	绝缘纸的老化诊断法	78
2.2.2	油的老化诊断法	82
2.2.3	变压器本体的老化诊断法	83
2.3	OF 电缆	86
2.3.1	油压、油量的监视	87
2.3.2	绝缘油性能的检查	87
2.4	电容器	90
2.4.1	现场诊断法	90
2.4.2	油中溶解气体与局部放电	92
2.4.3	判定标准的考虑方法	93
2.5	管道充气电缆	93
2.5.1	局部放电测量	94
2.5.2	振动、音响的检测	94
2.5.3	分解气体的检测	95
2.5.4	气体中的水分含量	95
2.5.5	漏气与气压	95
2.6	CV 电缆	96
2.6.1	CV 电缆的老化与事故举例	96
2.6.2	绝缘老化诊断的概要	100
2.6.3	停止运行诊断法	101
2.6.4	在线诊断法	116
2.6.5	特高压 CV 电缆的绝缘诊断	127
2.7	企业进行绝缘诊断的实例	130
2.7.1	电 机	131
2.7.2	变压器	131
2.7.3	高压电缆	134
2.8	其他诊断法(电缆护层的外伤检知法)	136
	参考文献	138

第3章 电力设备与环境问题

3.1 二噁英的发生和对策	144
3.1.1 发生源	144
3.1.2 二噁英	146
3.1.3 PVC 的分类回收技术	148
3.1.4 无公害电缆	152
3.2 PCB 的毒性与处理技术	155
3.2.1 用作绝缘油的 PCB 的特征	155
3.2.2 PCB 的无害化处理	157
3.3 因氟里昂而产生的臭氧洞与对策	161
3.4 用水热过程对二噁英、PCB、氟里昂进行 处理的方法	163
3.5 其他环境问题	164
参考文献	165
后 记	166

第1章

绝缘材料的老化

1.1 电力设备的绝缘结构由电极和电介质组成

1.2 电力设备的绝缘材料

1.3 绝缘老化

1.1 电力设备的绝缘结构由电极和电介质组成

本书所涉及的电力设备、电缆(下面统称为电力设备)中,其电力设备主要是指电机(发电机、电动机)、变压器、电容器等,电缆则指的是 OF 电缆、充气管道中的输电线和 CV 电缆(即交联电缆)等。

这些电力设备基本上都是由导体和置于其间的绝缘体构成的,而其中的绝缘体则有各种各样的成分和组合方式。

例如,图1.1(a)所示为固体绝缘的情况。仔细观察可知,仅仅只

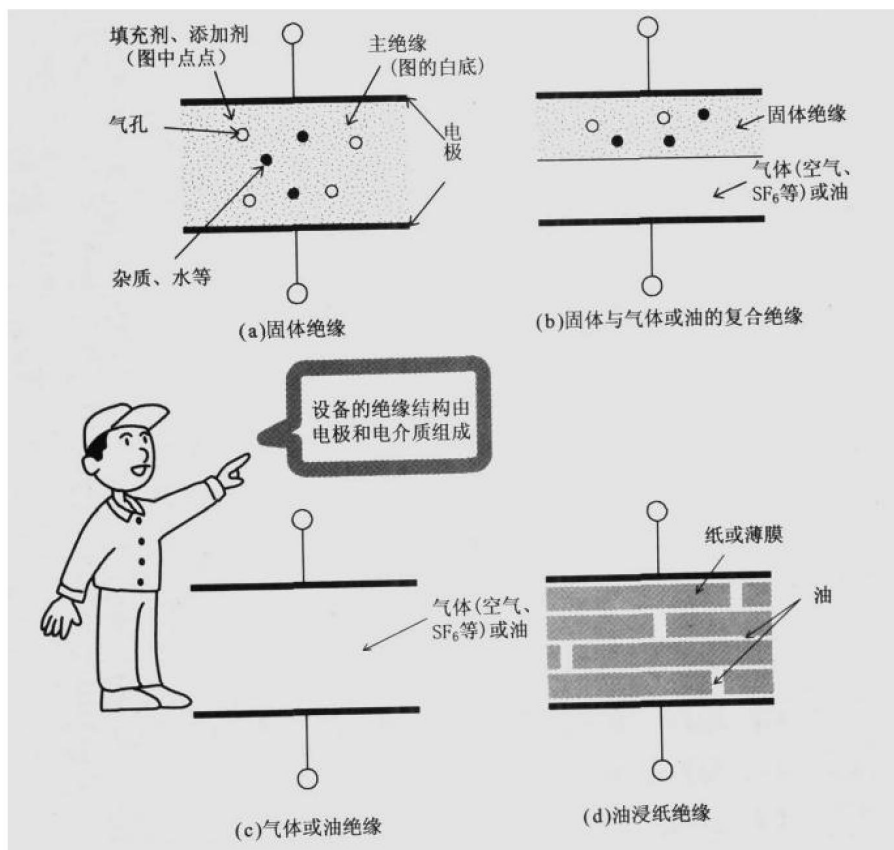


图 1.1 电力设备绝缘的基本构成

有单一绝缘体的情况是很少的,多数场合是由主绝缘与添加物、填充剂,甚至还有高电压绝缘中不希望出现的气孔、杂质等各种各样不同材料的混合体构成的。图 1.1(b)表示由主绝缘与气体或绝缘油层串联的情况。另外,图 1.1(c)是由单一的气体或绝缘油构成的绝缘层。图 1.1(d)则是由绝缘纸和油构成的多层油浸绝缘。

电力设备中使用了各种不同的绝缘材料,它们具有不同的形状,但基本均如图 1.1 所示,可以认为都是置于电极之间的电介质(电容器)。因此,施加电压后将呈现绝缘体固有的性质。

当固体电介质置于电极之间并加上直流电压时,如图 1.2 所示,最初流过的是**瞬时充电电流**,然后流过的是随时间减少的**吸收电流**。这是因为电介质中的原子极化和转向极化等各种极化作用所导致的结果。之后,电流达到一定的稳定值,称其为**漏电流**,其大小一般由参数绝缘电阻来表征。如果把电极短路,将有反方向的**瞬时放电电流**流过,然后再是吸收电流(称为**剩余电流**)。通常电力设备的绝缘测量使用的参数是漏电流,但吸收电流和放电电流也是材料特性的固有信息,将在以后讨论的绝缘诊断中用到。

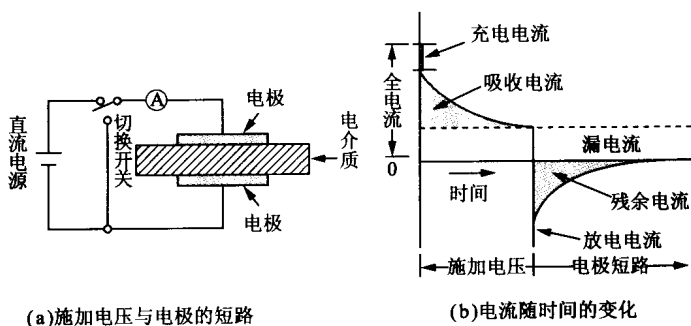


图 1.2 固体电介质中的直流电流

本书中涉及到一些绝缘诊断的有关规定、法规,以及对环境问题的有关规定,均是针对日本的具体情况而言,仅供读者参考。——译者著

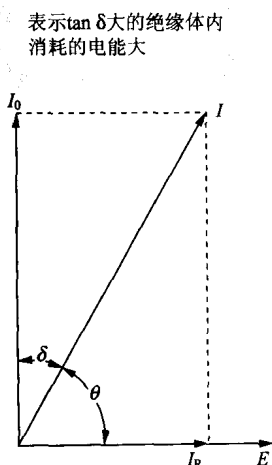


图 1.3 固体电介质的交流电流

给电介质施加交流电压后, 将如图 1.3 所示, 如果电介质无损耗, 将有与电压相位相差 90 度的电流 I_0 流过。但在实际情况下, 除了 I_0 以外还将有与电压同相位的电流 I_R 存在, 因此流过的电流是两者合成电流 I 。这样因 I_R 引起的消耗在电介质中的能量称为介质损耗, 可用下面的式子表示:

$$W = EI_R = EI \cos \theta = E^2 \omega C \cos \theta \quad (1.1)$$

当 δ 很小时, $\cos \theta \approx \tan \delta$, 因此式(1.1)可表示为

$$W \approx E^2 \omega C \tan \delta \quad (1.2)$$

设电容器的几何电容量为 C_0 、电介质的相对电容率为 ϵ_r , 则有

$$W = E^2 \omega C_0 \epsilon_r \tan \delta \quad (1.3)$$

这里 $\tan \delta$ 称为介质损耗角正切, δ 则为介质损耗角。另外, $\epsilon_r \cdot \tan \delta$ 也称为介质损耗因数(loss factor)(ϵ_r 有时也用 ϵ 或 ϵ_s 来表示)。

由于介质损耗是由绝缘体发热等原因引起的, 特别对于高电压绝缘而言, 应选择 $\epsilon_r \cdot \tan \delta$ 较小的材料。另外, 这个物理参数还是对电力设备进行绝缘诊断时用来测量老化的指标。

1.2 电力设备的绝缘材料^[1]

电力设备的绝缘材料可大致分为固体、液体、气体三大类。如果进一步细分, 则固体绝缘可分为注射绝缘和挤出绝缘, 液体绝缘则有绝缘油与纤维纸构成的油浸绝缘, 气体绝缘中还有由空气以及 SF_6 气体构成的不同的气体绝缘方式。这些绝缘方式与各种不同的电力设备结构, 可得到如下的组合:

- ① 电机用的注塑树脂固化成型的云母复合绝缘方式, 干式变压

器和气体绝缘设备用的隔离、支撑等的注射绝缘方式,CV 电缆终端用的橡胶成型绝缘方式;

- ② 变压器、电容器、OF 电缆等用的油浸绝缘方式;
- ③ 交流电缆中用挤出机生产的交联聚乙烯绝缘方式;
- ④ 断路器和充气管道电缆用的气体绝缘方式;
- ⑤ 绝缘子等用的瓷绝缘方式。

上述这些绝缘方式的特征总结归纳于表 1.1 中。

表 1.1 用于电气设备中的主要绝缘材料与其特性、用途

绝缘材料	主要的构成材料	特 征	用 途
云母绝缘物	云母(片状与集层云母) 热固性树脂(以环氧树脂为主) 带材(玻璃纤维, 聚芳酰胺纸, 聚酯薄膜等)	固体绝缘 高强度 高耐热 高耐局部放电	电机
油浸绝缘物	绝缘油 { 矿物油 合成油 固体绝缘物 { 绝缘纸(电缆纸, 皱纹纸等) 半合成纸(层合纸, 混抄纸等) 薄膜(聚丙烯等) 层压板	液体绝缘 高电压绝缘 高耐电场 无气孔	变压器、 电容器、 OF 油浸纸 电缆
注塑型绝缘物	热固性树脂(主要为环氧树脂) 填充剂(氧化铝, 氧化硅等)	固体绝缘 阻燃性 高强度 高耐热	变压器、 变流器、 气体绝缘设备 支撑体
气体绝缘物	六氟化硫气体(SF ₆)	气体绝缘 高耐电场 高消弧性	充气变配电 设备
挤出型绝缘物	热塑性树脂(交联聚乙烯) 外护层: 聚氯乙烯	固体绝缘 高耐电场	交联电缆
成型绝缘物	橡胶(乙丙橡胶等)	固体绝缘 高耐电场	CV 电缆终端、 接头等
陶 瓷	绝缘子、绝缘套管	固体绝缘 高耐电场	设备的高电压 引出线