



国家电网
STATE GRID

国家电网公司
生产技能人员职业能力培训通用教材

高电压技术

国家电网公司人力资源部 组编

GUOJIADIANWANGGONGSI
SHENGCHANJINENG RENYUAN
ZHIYENENGLI PEIXUN
TONGYONG JIAOCAI



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要 ◀

《国家电网公司生产技能人员职业能力培训教材》是按照国家电网公司生产技能人员标准化培训课程体系的要求,依据《国家电网公司生产技能人员职业能力培训规范》(简称《培训规范》),结合生产实际编写而成。

本套教材作为《培训规范》的配套教材,共 72 册。本册为通用教材的《高电压技术》,全书共十章、64 个模块,主要包括电介质的极化、电导和损耗,气体放电过程及其击穿特性,固体电介质和液体电介质的击穿特性,线路和绕组中的波过程,雷电及防雷设备,输电线路防雷保护,发电厂和变电站的防雷保护,电力系统操作过电压,电力系统工频过电压与谐振过电压,电力系统的绝缘配合等。

本书是供电企业生产技能人员的培训教学用书,也可以作为电力职业院校教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/国家电网公司人力资源部组编. —北京:中国电力出版社, 2010

国家电网公司生产技能人员职业能力培训通用教材

ISBN 978-7-5083-9616-3

I. 高… II. 国… III. 高电压-技术培训-教材
IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 195578 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 5 月第一版 2010 年 5 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11.25 印张 205 千字

印数 0001—3000 册 定价 20.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

《国家电网公司生产技能人员职业能力培训通用教材》

编 委 会

主 任 刘振亚

副 主 任 郑宝森 陈月明 舒印彪 曹志安 栾 军

李汝革 潘晓军

成 员 许世辉 王风雷 张启平 王相勤 孙吉昌

王益民 张智刚 王颖杰

编写组组长 许世辉

副 组 长 方国元 张辉明 何晓英

成 员 王 丽 吕 亮 陈 莅 鞠宇平 倪 春

江振宇 李群雄 曹爱民 郭智洋 石 玲

刘 宇



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

生产技能人员职业能力培训通用教材

前 言

为大力实施“人才强企”战略，加快培养高素质技能人才队伍，国家电网公司按照“集团化运作、集约化发展、精益化管理、标准化建设”的工作要求，充分发挥集团化优势，组织公司系统一大批优秀管理、技术、技能和培训教学专家，历时两年多，按照统一标准，开发了覆盖电网企业输电、变电、配电、营销、调度等 34 个职业种类的生产技能人员系列培训教材，形成了国内首套面向供电企业一线生产人员的模块化培训教材体系。

本套培训教材以《国家电网公司生产技能人员职业能力培训规范》(Q/GDW 232—2008)为依据，在编写原则上，突出以岗位能力为核心；在内容定位上，遵循“知识够用、为技能服务”的原则，突出针对性和实用性，并涵盖了电力行业最新的政策、标准、规程、规定及新设备、新技术、新知识、新工艺；在写作方式上，做到深入浅出，避免烦琐的理论推导和论证；在编写模式上，采用模块化结构，便于灵活施教。

本套培训教材包括通用教材和专用教材两类，共 72 个分册、5018 个模块，每个培训模块均配有详细的模块描述，对该模块的培训目标、内容、方式及考核要求进行了说明。其中：通用教材涵盖了供电企业多个职业种类共同使用的基础知识、基本技能及职业素养等内容，包括《电工基础》、《电力生产安全及防护》等 38 个分册、1705 个模块，主要作为供电企业员工全面系统学习基础理论和基本技能的自学教材；专用教材涵盖了相应职业种类所有的专业知识和专业技能，按职业种类单独成册，包括《变电检修》、《继电保护》等 34 个分册、3313 个模块，根据培训规范职业能力要求，I、II、III 三个级别的模块分别作为供电企业生产一线辅助作业人员、熟练作业人员和高级作业人员的岗位技能培训教材。

本套培训教材的出版是贯彻落实国家人才队伍建设总体战略，充分发挥企业培养高技能人才主体作用的重要举措，是加快推进国家电网公司发展方式和电网发展方式转变的具体实践，也是有效开展电网企业教育培训和人才培养工作的重要基础，必将对改进生产技能人员培训模式，推进培训工作由理论灌输向能力培养转型，提高培训的针对性和有效性，全面提升员工队伍素质，保证电网安全稳定运行、支

撑和促进国家电网公司可持续发展起到积极的推动作用。

本册为通用教材部分的《高电压技术》，由陕西省电力公司具体组织编写。

全书第一章，第二章由陕西省电力公司陈莅编写；第三章，第十章由陕西省电力公司王丽编写；第五章至第七章由陕西省电力公司吕亮编写；第四章，第八章，第九章由陕西省电力公司王丽、吕亮合作编写。全书由王丽担任主编。湖北省电力公司汪祥兵担任主审，湖北省电力公司邓万婷、杜军参审。

由于编写时间仓促，难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见，使之不断完善。



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

生产技能人员职业能力培训通用教材

目 录

前言

第一章 电介质的极化、电导和损耗	1
模块 1 电介质的极化与介电系数 (TYBZ01401001)	1
模块 2 电介质的电导与性能 (TYBZ01401002)	4
模块 3 电介质的损耗及等值电路 (TYBZ01401003)	6
第二章 气体放电过程及其击穿特性	10
模块 1 气体放电过程的描述 (TYBZ01402001)	10
模块 2 气体放电机理 (TYBZ01402002)	13
模块 3 不均匀电场气体放电及其击穿特性 (TYBZ01402003)	15
模块 4 电晕放电 (TYBZ01402004)	18
模块 5 均匀电场和稍不均匀电场的气体放电及其击穿特性 (TYBZ01402005)	20
模块 6 雷电放电 (TYBZ01402006)	21
模块 7 电介质的沿面放电和污闪 (TYBZ01402007)	23
模块 8 冲击电压下气隙的击穿特性 (TYBZ01402008)	27
模块 9 气隙伏秒特性 (TYBZ01402009)	31
模块 10 大气条件对气隙击穿电压的影响及其校正 (TYBZ01402010)	32
模块 11 SF ₆ 气体的特性及微水标准 (TYBZ01402011)	35
第三章 固体电介质和液体电介质的击穿特性	38
模块 1 液体和固体电介质的极化、电导和损耗 (TYBZ01403001)	38
模块 2 固体电介质的击穿原理 (TYBZ01403002)	43
模块 3 固体电介质击穿电压的影响因素 (TYBZ01403003)	44
模块 4 提高固体电介质击穿电压的方法 (TYBZ01403004)	46

模块 5	固体电介质的老化 (TYBZ01403005)	48
模块 6	液体电介质的击穿原理 (TYBZ01403006)	50
模块 7	影响液体电介质击穿电压的因素 (TYBZ01403007)	51
模块 8	提高液体电介质击穿电压的方法 (TYBZ01403008)	53
模块 9	液体电介质的老化 (TYBZ01403009)	54
模块 10	组合绝缘的电气强度 (TYBZ01403010)	56
模块 11	组合绝缘的击穿特性 (TYBZ01403011)	57
模块 12	对电介质性能的全面要求 (TYBZ01403012)	58
第四章	线路和绕组中的波过程	60
模块 1	无损耗单导线线路中的波过程 (TYBZ01404001)	60
模块 2	行波的折射与反射 (TYBZ01404002)	63
模块 3	行波通过串联电感和并联电容 (TYBZ01404003)	67
模块 4	无损耗平行多导线系统中的波过程 (TYBZ01404004)	69
模块 5	冲击电晕对线路波过程的影响 (TYBZ01404005)	72
模块 6	变压器绕组中的波过程 (TYBZ01404006)	74
模块 7	冲击电压在绕组中的传递 (TYBZ01404007)	79
第五章	雷电及防雷设备	81
模块 1	雷电过电压 (TYBZ01405001)	81
模块 2	避雷针、避雷线的保护范围 (TYBZ01405002)	84
模块 3	避雷器 (TYBZ01405003)	88
模块 4	接地装置 (TYBZ01405004)	93
第六章	输电线路防雷保护	97
模块 1	输电线路的感应雷过电压 (TYBZ01406001)	97
模块 2	输电线路的直击雷过电压和耐雷水平 (TYBZ01406002)	99
模块 3	输电线路的雷击跳闸率 (TYBZ01406003)	103
模块 4	输电线路防雷保护 (TYBZ01406004)	104
第七章	发电厂和变电站的防雷保护	108
模块 1	直击雷保护 (TYBZ01407001)	108
模块 2	变电站内避雷器的保护作用 (TYBZ01407002)	111
模块 3	变电站的进线段保护 (TYBZ01407003)	114

模块 4	变压器的防雷保护 (TYBZ01407004)	117
模块 5	变压器的中性点保护 (TYBZ01407005)	119
模块 6	配电变压器的防雷保护 (TYBZ01407006)	122
模块 7	气体绝缘变电站 (GIS) 的过电压保护 (TYBZ01407007)	123
第八章	电力系统操作过电压	126
模块 1	解列过电压 (TYBZ01408001)	126
模块 2	开断电容性负载时的过电压 (TYBZ01408002)	128
模块 3	空载线路合闸的过电压 (TYBZ01408003)	131
模块 4	电弧接地过电压 (TYBZ01408004)	134
模块 5	切除空载变压器过电压 (TYBZ01408005)	139
第九章	电力系统工频过电压与谐振过电压	142
模块 1	工频过电压 (TYBZ01409001)	142
模块 2	线性谐振过电压 (TYBZ01409002)	144
模块 3	非线性谐振过电压 (TYBZ01409003)	145
模块 4	参数谐振过电压 (TYBZ01409004)	148
模块 5	常见谐振过电压实例 (TYBZ01409005)	151
第十章	电力系统绝缘配合	155
模块 1	绝缘配合的概念和原则 (TYBZ01410001)	155
模块 2	绝缘配合惯用法 (TYBZ01410002)	156
模块 3	电气设备的绝缘水平的确定 (TYBZ01410003)	157
模块 4	中性点接地方式对绝缘水平的影响 (TYBZ01410004)	161
模块 5	架空线路的绝缘配合 (TYBZ01410005)	163
模块 6	电气设备试验电压的确定 (TYBZ01410006)	167
参考文献		169



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

国家电网公司

生产技能人员职业能力培训通用教材

第一章 电介质的极化、电导和损耗

模块 1 电介质的极化与介电系数 (TYBZ01401001)

【模块描述】本模块介绍电介质极化的概念、极化的种类和电介质的相对介电常数。通过定义讲解、理论分析,了解电介质极化的知识及其在工程上的意义。

【正文】

一、电介质极化的概念

电气设备的绝缘对保证设备及整个电力系统的安全运行起着至关重要的作用。绝缘的作用是将不同电位的导体分隔开,使导体间没有电气连接,从而可以保持不同的电位。具有绝缘作用的材料称为电介质。

电介质在电场作用下所发生的束缚电荷的弹性位移和极性分子的转向现象,称为电介质的极化。通俗的理解就是:在电场的作用下,电介质由中性转化为对外显现电性的过程。极化的结果是:在电介质沿电场方向的两端出现等量异号电荷形成电矩。与正极板相对的一端出现负电荷,与负极板相对的一端出现正电荷。

二、电介质极化的种类

根据电介质的物质结构,极化有以下四种基本形式。

1. 电子式极化

在外电场的作用下,物质原子中的电子轨道相对于原子核发生位移,从而产生感应电矩的过程称为电子式极化。

电子式极化存在于一切电介质中,其特点是极化过程所需的时间极短,约 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ s,极化程度取决于电场强度,与电源频率无关,温度对电子式极化的影响不大。另外,电子式极化属弹性极化,去掉外电场,正、负电荷间的吸引力使得正、负电荷作用中心重合,所以这种极化没有能量损耗。

2. 离子式极化

离子式结构的电介质在无外电场作用时,每个分子的正、负离子的作用中心是重合的。在外电场的作用下,电场力使得正、负离子发生相对位移,整个分子呈现



极性。这种极化形式称为离子式极化。

离子式极化存在于离子结构的电介质中，其特点是极化过程所需的时间极短，约 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{s}$ ，故极化程度与电源频率无关。离子式极化也属弹性极化，无能量损耗。随着温度的升高，由于离子间的结合力降低，离子式极化的程度略有增加。

3. 偶极子式极化

极性电介质是由偶极分子组成的。偶极子是一种特殊的分子，其正、负电荷的作用中心不重合，形成永久性的偶极矩，即单个偶极子呈现极性。无外电场作用时，由于偶极子处于杂乱无章的热运动状态，所以整个电介质对外并不呈现极性。在外电场作用下，原来混乱分布的偶极子转向电场方向定向排列，呈现出极性。这种极化方式称为偶极子式极化。

偶极子式极化存在于极性电介质中，其特点是极化过程所需时间较长，约 $10^{-10} \sim 10^{-2} \text{s}$ ，所以极化程度与电源频率有关，频率较高时偶极子来不及转动，因而极化率减小。由于偶极子在转向时需要克服分子间的作用力，即需要消耗电场能量，消耗的能量在复原时不能收回，所以偶极子式极化属非弹性极化。

温度对偶极子式极化的影响较大。当温度升高时分子间的联系力减弱，使极化程度加强；但当温度达到一定值时，由于分子的热运动加剧，妨碍偶极子沿电场方向转向，使极化程度降低。所以，随温度增加极化程度先增加后降低。

上述三种极化是由带电质点的弹性位移或转向形成的，均发生在单一电介质中，是极化最基本的形式。

4. 夹层式极化

实际电气设备的绝缘通常采用多层电介质的绝缘结构，因而在不同介质的界面处会发生由带电质点的移动所形成的夹层式极化。

下面以最简单的双层电介质为例分析夹层式极化的物理过程。

如图 TYBZ01401001-1 所示， C_1 、 C_2 为各层介质的电容， G_1 、 G_2 为各层介质的电导， U_1 、 U_2 为各层介质上的电压。在开关 S 刚合闸的瞬间，介质上的电压按电容分配，即 $t=0$ 时， $U_1 / U_2 = C_2 / C_1$ ；到达稳态时，介质上的电压按电导分配，即 $t \rightarrow \infty$ 时， $U_1 / U_2 = G_2 / G_1$ 。由于两层电介质的特性不同，一般情况下 $C_2 / C_1 \neq G_2 / G_1$ ，所以初始电压分布与稳态电压分布通常不相同，即合闸后两层介质上的电荷需要重新分配。

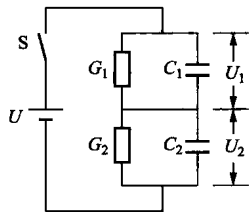


图 TYBZ01401001-1 双层介质极化模型

假设 $C_1 > C_2$ 、 $G_1 < G_2$ ，则 $t \rightarrow 0$ 时， $U_1 < U_2$ ； $t \rightarrow \infty$ 时， $U_1 > U_2$ 。因 $U_1 + U_2 = U$ ，

则在过渡过程中 C_1 要通过 G_2 从电源再多充一部分电荷（称为吸收电荷），而 C_2 要通过 G_2 放掉一部分电荷，于是在分界面处将积聚起一些电荷。这种使夹层电介质的交界面处积聚电荷的过程，称为夹层式极化。电荷积聚过程所形成的电流称为吸收电流。由于夹层极化中有吸收电荷，故夹层式极化相当于增大了整个电介质的等值电容。

夹层式极化存在于不均匀夹层介质中。这种极化因涉及电荷的移动和积聚，所以必然伴随有能量损耗。由于电荷的积聚是通过介质的电导进行的，而介质的电导一般很小，所以极化过程较慢，一般需要数秒到数分钟，所以这种极化只有在直流和低频交流电压下才能表现出来。

三、电介质的相对介电常数

1. 定义

电介质的相对介电常数 ϵ_r 用来表征电介质在电场作用下极化现象的强弱，其物理意义表示极板间放入电介质后电容量或电荷量比极板间为真空时增大的倍数。 ϵ_r 值由电介质的材料决定，并且随温度、频率而变化。其计算式为

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0} \quad (\text{TYBZ01401001-1})$$

式中 ϵ_0 ——真空的介电常数， $1/36\pi \times 10^{-9} \text{ F/m}$ ；

ϵ ——介质的介电常数；

C_0 ——平行平板电容器在真空中的电容量，F；

C ——平行平板电容器极板间插入固体介质后的电容量，F。

2. 气体电介质的介电常数

由于气体电介质的密度很小，所以气体电介质的介电常数都很小，在工程应用中一切气体电介质的 ϵ_r 都可看作 1。

3. 液体电介质的介电常数

(1) 中性液体电介质。中性液体电介质（如变压器油、苯、硅有机油等）的相对介电常数 ϵ_r 在 1.8~2.8 范围内。相对介电常数 ϵ_r 具有不大的负温度系数。

(2) 极性液体电介质。这类电介质的相对介电常数较大，其值在 3~80，用作绝缘介质的 ϵ_r 值一般在 3~6。若用作电容器的浸渍剂，可使电容器的比电容增大。但此类液体电介质在交变电场中的损耗较大，故高压绝缘中很少应用。

极性电介质的 ϵ_r 与温度有关， ϵ_r 在温度较低时先随温度的升高而增大，以后当热运动较强烈时， ϵ_r 又随温度上升而减小。

极性电介质的 ϵ_r 与电源频率有较大的关系，频率较低时，偶极分子能够跟随交变电场充分转向， ϵ_r 较大且其值与频率大小无关。当频率很高时偶极分子转向跟不

上电场方向的改变,极化率减小,因而 ϵ_r 减小。

4. 固体电介质的介电常数

(1) 中性和弱极性固体电介质。这类电介质只有电子式极化和离子式极化,相对介电常数较小,一般为2.0~2.7。相对介电常数随温度的升高略有下降。

石蜡、石棉、聚乙烯、聚丙烯、无机玻璃等属于此类电介质。

(2) 极性固体电介质。这类电介质的相对介电常数较大,一般为3~6。 ϵ_r 与温度、频率的关系和极性液体介质的相似。

树脂、纤维、橡胶、有机玻璃、聚氯乙烯等属于极性固体电介质。

(3) 离子性电介质。固体无机化合物多数属于离子式结构电介质,如云母、陶瓷等, ϵ_r 一般具有正的温度系数,其值约在5~8。

四、电介质极化在工程实际中的意义

(1) 选择绝缘材料。如对电容器应选择 ϵ_r 较大的电介质作为绝缘材料,这样可以减小电容器单位容量的体积和重量。对于其他电气设备如电缆,应选择 ϵ_r 较小的电介质,这样可以减少电缆工作时的电容电流。

(2) 多层介质的合理配合。几种电介质组合使用时,由于在交流电压及冲击电压作用下,各层介质中的电场强度分布与 ϵ_r 成反比,所以要注意选择各介质的 ϵ_r 值,使各层介质中的电场分布较均匀。

(3) 介质损耗与介质的极化类型有关,而介质损耗对绝缘老化和热击穿有很大的影响。

(4) 在绝缘预防性试验中,可用夹层式极化来判断绝缘受潮情况。

【思考与练习】

1. 什么叫电介质的极化?
2. 电介质极化的基本形式有哪几种?
3. 哪几种极化属于无损耗的极化?哪几种极化属于有损耗的极化?
4. 什么是相对介电常数?相对介电常数在工程上有什么意义?

模块2 电介质的电导与性能 (TYBZ01401002)

【模块描述】本模块介绍电介质电导的基本概念、特点及气体、液体和固体电介质的电导。通过定义讲解、理论分析,了解电介质电导的知识及其在工程上的意义。

【正文】

一、电介质电导的基本概念

电介质的内部总有一些自由的带电质点,在电场的作用下,带电质点会定向运

动形成电流,即电介质具有一定的导电性。表征电介质电导大小的物理量是绝缘的电导率 γ (或绝缘的电阻率 ρ , $\rho=1/\gamma$)。

电介质的电导与金属导体的电导有着本质的区别。电介质的电导主要是由离子移动造成的,电导很小,其电阻率 ρ 在 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围。随着温度的升高,电导增大,即电介质的电导具有正的温度系数。在外施电压的作用下,由介质的电导所引起的电流称为泄漏电流,温度越高,泄漏电流越大。所以在测量绝缘电阻或泄漏电流时应尽量在同一温度下进行,以便于对测量结果进行比较。电介质电导的数值与电压也有关系,通常在电介质接近击穿时电导急剧上升。

导体的电导主要由电子移动造成,电导极大,其电阻率 ρ 在 $10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围。随着温度的升高,金属的电导减小。

二、电介质的电导

1. 气体电介质的电导

外界游离因素在气体中会产生少量带电离子,在外电场作用下,这些带电离子定向运动构成气体电介质的电导。气体电介质中电流与电压的关系如图 TYBZ01401002-1 所示。当电场强度很小时($U < U_a$),电流随电压的升高而增加;当电场强度增大时($U_a < U < U_b$),电流趋于饱和,这是因为外界游离因素产生的离子接近全部落入电极形成电流,电流的大小取决于外界游离因素的强度。此时 ab 段内气体的电导很小,气体仍处于绝缘状态。当电场强度继续增大时($U > U_b$),气体电介质中将发生碰撞游离使电导迅速增大。当电压达 U_c 时,气隙被击穿。

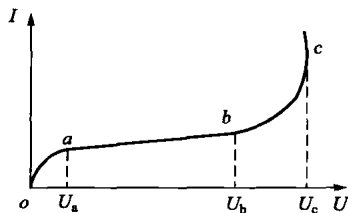


图 TYBZ01401002-1 气体电介质中
电流和电压的关系

2. 液体电介质的电导

液体电介质的电导主要由离子电导和电泳电导构成。离子电导是由液体本身和所含杂质的分子离解出的离子造成。电泳电导是由液体中的胶体质点吸附电荷带电造成的。

中性液体电介质本身分子不易离解,其电导主要是杂质分子离解出的离子;极性液体电介质的电导由杂质分子和电介质本身分子离解出的离子共同形成。所以当其他条件相同时,极性液体电介质的电导大于中性液体电介质的电导。强极性液体电介质如水、酒精等,其电导率已很大,所以不能作为绝缘材料使用。

液体电介质的电导与分子的极性、电场强度、温度及液体的纯净度有关。离子电导随温度的升高而增大。电场强度较小时,电导接近为一常数,电场强度较大时(超过某一定值),离解出来的离子数迅速增加,电导也就迅速增加。杂质对液体电



介质的电导影响很大,尤其是中性液体电介质。当液体电介质中的杂质含量增大时,其电导明显增大。

3. 固体电介质的电导

固体电介质的电导分为体积电导和表面电导两种。

体积电导由固体介质本身的离子和杂质离子构成,影响体积电导的因素主要有电场强度、温度和杂质。在电场强度较低时,固体介质的电导率与电场强度关系很小,场强较高时,介质电导随场强增大而迅速增大。温度升高,固体电介质的电导增大。固体电介质中常含有杂质,杂质使电介质内部导电粒子的数目增加,其电导增大。

表面电导主要由电介质表面吸附的水分和污物引起。固体电介质表面干燥清洁时,其表面电导很小;当电介质表面吸附潮气或沉积有污物时,其表面电导显著增大。表面电导的大小还与固体电介质本身的性质有关。憎水性电介质表面不易形成连续的水膜,表面电导比亲水性电介质的小。采取使介质表面洁净、烘干或涂以石蜡、有机硅、绝缘漆等措施,可以降低电介质的表面电导。

在测量固体电介质的泄漏电流(绝缘电阻)时,应采取措施消除电介质表面状况对测量值的影响。

三、介质电导在工程实际中的意义

(1) 电介质电导是绝缘预防性试验的理论依据。通过测量绝缘电阻、泄漏电流可以判断电气设备的绝缘状况。

(2) 多层电介质在直流电压作用下的稳态电压分布与各层电介质的电导成反比,选择合适的电导率可使各层电介质之间的电压分布较合理。

(3) 注意环境条件对介质电导的影响,如湿度对固体电介质表面电导的影响,对亲水性材料应进行防水处理;测量电气设备的绝缘电阻和泄漏电流时应注意湿度对测量值的影响。

【思考与练习】

1. 电介质的电导与金属导体的电导有何不同?
2. 固体电介质的电导可分为哪两部分?通常做电气设备试验时测的是哪一部分?

模块3 电介质的损耗及等值电路 (TYBZ01401003)

【模块描述】本模块介绍电介质的损耗及其等值电路。通过定义讲解、理论分析,了解电介质损耗及介质损失角的基本概念,熟悉电介质的等值电路。

【正文】

一、电介质损耗的基本概念

1. 电介质损耗的概念

从电介质的极化和电导的概念可以看出, 电介质在电压作用下有能量损耗, 称为介质损耗, 简称介损。介质损耗由下列三部分组成:

(1) 电导损耗。它由电导电流(泄漏电流)流过电介质产生。电导损耗在交流电压和直流电压作用下均存在。

(2) 极化损耗。它由极性电介质中的偶极子式极化和多层电介质的夹层极化引起的损耗。极化损耗只在交流电压作用下才存在。

(3) 游离损耗。它是由液体及固体介质中的局部放电引起的损耗。游离损耗只在外施电压超过一定值时才会出现, 并且随电压升高而急剧增加。游离损耗在交流电压和直流电压作用下均会出现。

当外加电压低于发生局部放电所需的电压时, 在直流电压作用下, 因介质中没有周期性的极化过程, 所以介质中只有电导损耗; 在交流电压作用下, 介质损耗包括电导损耗以及周期性极化引起的能量损耗。

2. 电介质的等值电路

电介质的等值电路如图 TYBZ01401003-1 所示, 该等值电路适用于直流电压和交流电压。电路中 C_0 支路表示介质无能量损耗的极化, 支路中流过的电流 i_c 称为电容电流; r_g 支路表示电导引起的损耗, 支路中流过的电流 i_g 称为电导电流或泄漏电流; r_a-C_a 支路表示有能量损耗的极化, 支路中流过的电流 i_a 称为吸收电流。并联等值电路如图 TYBZ01401003-2 所示或串联等值电路如图 TYBZ01401003-3 所示。

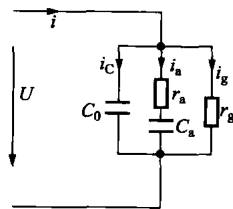


图 TYBZ01401003-1 电介质的等值电路

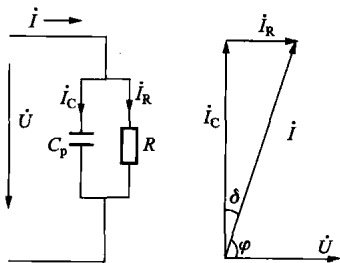


图 TYBZ01401003-2 并联等值电路及相量图

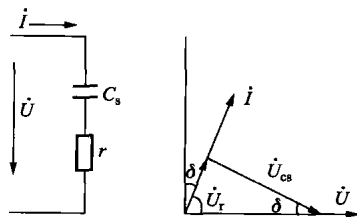


图 TYBZ01401003-3 串联等值电路及相量图

需要指出的是: 等值电路只有计算上的意义, 并不反映介质损耗的物理意义。



3. 介质损耗角正切值 $\tan\delta$

以并联等值电路为例。当给电介质两端施加交流电压时, 流过介质的电流包含有功分量 I_R 和无功分量 I_C 。把功率因数角 φ 的余角 δ 称为介质损失角, 则 $\tan\delta = I_R/I_C = 1/\omega CR$ 。介质上所加电压与流过介质电流的相量关系如图 TYBZ01401003-2 所示, 则介质损耗 P 为

$$P = UI_R = UI_C \tan\delta = U^2 \omega C_p \tan\delta \quad (\text{TYBZ01401003-1})$$

从式 (TYBZ01401003-1) 可知, P 值与试验电压、试品电容量及电源频率有关, 不同试品间难以比较。如果外施电压和电源频率不变, 则介质损耗与 $\tan\delta$ 成正比, 所以通常用介质损失角正切值 $\tan\delta$ 来表示介质在交流电压作用下的损耗。 $\tan\delta$ 仅与介质本身的特性有关, 与被试品的几何尺寸无关, 当绝缘受潮或绝缘中有大量气泡、杂质的情况下, $\tan\delta$ 会增大。故对同类型被试品绝缘的优劣, 可以通过 $\tan\delta$ 值的大小来判断。

需要说明的是介质损失角正切值 $\tan\delta$ 即可反映介质本身的绝缘状况, 同时介质损耗本身也是导致绝缘老化和损坏的一个原因, 因为介质损耗将引起绝缘内部发热, 温度升高, 从而使泄漏电流增大和有损极化加剧, 导致介质损耗更大。所以, 对于运行中的电气设备, 应监测其介质损耗的变化趋势, 这对判断设备绝缘的品质具有重要意义。

二、影响介质损失角正切值 $\tan\delta$ 的因素

影响 $\tan\delta$ 值的因素主要有频率、温度和电压。

(1) 频率对 $\tan\delta$ 的影响很大, 在进行试验时, 电源频率变化很微小, 可认为频率对 $\tan\delta$ 没有影响。

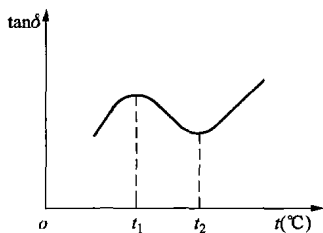


图 TYBZ01401003-4 极性介质的 $\tan\delta$ 与温度的关系

(2) 温度对 $\tan\delta$ 的影响与介质结构有关。中性或弱极性电介质的损耗主要是电导损耗, 损耗较小, 当温度升高时, $\tan\delta$ 增大。极性电介质的 $\tan\delta$ 与温度的关系如图 TYBZ01401003-4 所示。

(3) 电压较低 (场强较小) 时, $\tan\delta$ 与电压无关。当介质中含有气泡时, 外施电压升高到气泡的起始游离电压后, 将发生局部放电, $\tan\delta$ 值将随电压的升高明显增大。所以在较高电压下测量 $\tan\delta$, 可以检查介质中是否含有气隙, 也可以发现介质老化分层、龟裂等缺陷。

三、电介质的介质损耗

1. 气体电介质中的损耗

当外施电压小于气体发生碰撞游离所需的电压时, 气体中的损耗主要是电导损

耗, 损耗极小, 可忽略不计。所以常用气体作为标准电容器的介质。当外施电压超过起始游离电压 U_0 时, 损耗随电压的升高急剧增大。如图 TYBZ01401003-5 所示。

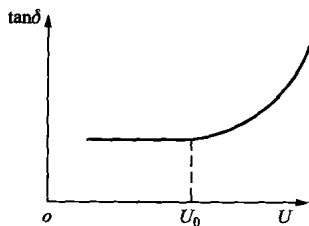


图 TYBZ01401003-5 气体的 $\tan\delta$ 与电压的关系

2. 液体电介质中的损耗

中性或弱极性液体电介质的损耗主要是电导损耗, 损耗较小, $\tan\delta$ 与温度及电场的关系和电导相似: 温度升高, $\tan\delta$ 增大。电场强度小于某定值时, $\tan\delta$ 接近为一常数, 电场强度超过某定值时, $\tan\delta$ 随电场强度的增大而增大。极性液体电介质的 $\tan\delta$ 与温度的关系如图 TYBZ01401003-4 所示。

3. 固体电介质中的损耗

固体电介质通常分为分子式结构介质、离子式结构介质、不均匀结构介质。分子结构中的中性电介质如石蜡、聚乙烯等, 以及离子结构的电介质如云母等, 其损耗主要由电导引起, 因其电导很小, 所以介质损耗也很小。分子结构中的极性电介质, 如纤维、有机玻璃等, 介质损耗较大, 高频下更严重。其值与温度的关系同极性液体介质。

不均匀结构的介质, 其损耗的大小取决于其中各成分的性能及数量间的比例。

四、介质损耗在工程实际中的意义

- (1) 选择绝缘材料。 $\tan\delta$ 过大会引起介质严重发热, 加速绝缘劣化。
- (2) 在电气设备绝缘预防性试验中, $\tan\delta$ 值的测量是基本的试验项目, 可根据 $\tan\delta$ 值的变化判断电气设备的绝缘品质。通过测量 $\tan\delta$ 与 U 的关系曲线还可判断绝缘内部是否发生局部放电。

【思考与练习】

1. 什么是介质损耗? 影响介质损耗的因素有哪些?
2. 为什么要以 $\tan\delta$ 来表示电介质的损耗?
3. 介质损耗在工程上有什么意义?