

电机工程手册

第3篇 高电压技术

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

73.21073
210
3:2

电机工程手册

第3篇 高电压技术

(试 用 本)

机械工程手册 编辑委员会
电机工程手册



机械工业出版社

本篇内容包括：高电压类型和特点；高压静电场；气、液、固体绝缘特性；高电压试验设备和测量及试验方法等。针对高压电气设备制造、运行中遇到的技术问题，着重阐述了有关绝缘特性的基础理论；列出了必要的数据和设计、计算公式，并提示了解决这些技术问题的主要途径和措施。

电机工程手册

第3篇 高电压技术

(试用本)

西安高压电器研究所 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $6\frac{1}{2}$ · 字数 177 千字

1978 年 2 月北京第一版·1978 年 2 月北京第一次印刷

印数 00,001—83,000 · 定价 0.52 元

*

统一书号：15033·4484

编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来,特别是无产阶级文化大革命以来,机械工业在伟大的领袖和导师毛泽东主席的无产阶级革命路线指引下,坚持政治挂帅,以阶级斗争为纲,贯彻“**独立自主、自力更生**”的方针,取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学技术方面的经验,加强机械工业科学技术的基础建设,适应实现“四个现代化”的需要,我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》,使出版工作更好地为无产阶级政治服务,为工农兵服务,为社会主义服务。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用,也可供教学及其他有关人员参考。《手册》在内容和表达方式上,力求做到深入浅出,简明扼要,直观易懂,归类便查,以便广大机电工人使用,有利于工人阶级技术队伍的发展和壮大。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书,着重介绍各专业的理论基础,常用计算公式、数据、资料、关键问题以及发展趋向。在编写中,力求做到立足全局,勾划概貌,反映共性,突出重点。读者在综合研究和处理技术问题时,《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成,构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分,共七十九篇;《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分,共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区的科技交流部门, 为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中, 广泛征求广大机电工人的意见, 坚持实行工人、技术人员和领导干部三结合的原则, 发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面, 广泛征求意见, 先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验, 试用本在内容和形式方面, 一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证, 提出批评和建议, 以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书是“电机工程手册”第3篇, 由西安高压电器研究所主编, 参加编写的有西安交通大学, 沈阳变压器研究所等单位。提供初稿或资料的有华中工学院、一机部西安设计院、上海电缆研究所、西安电瓷研究所、抚顺电瓷厂、西安供电局等单位。北京开关厂、北京供电局以及许多有关单位对本篇的编审工作给予了大力支持和帮助, 在此一并致谢。

机械工程手册
电机工程手册 编辑委员会编辑组

目 录

编辑说明

常用符号表

第 1 章 概 述

- 1 高电压技术的主要内容 3-7
 - 1.1 绝缘特性的研究 3-7
 - 1.2 过电压及其保护措施的研究 3-7
 - 1.3 高电压试验设备和高电压测量技术的研究 3-7
 - 1.4 试验方法的研究 3-7
 - 1.5 高电压技术在其他技术领域的应用 3-7
- 2 高电压的类型和特点 3-7
 - 2.1 直流和工频交流高电压 3-2
 - 2.2 雷电高电压 3-2
 - 2.3 电力系统的内部过电压 3-3
 - 2.4 其他类型高电压 3-6

第 2 章 高压静电场

- 1 工程上常遇到的静电场问题 3-6
 - 1.1 均匀电场与不均匀电场 3-6
 - 1.2 边缘效应与尖端效应 3-7
 - 1.3 多层电介质中的电场分布 3-7
 - 1.4 静电感应 3-7
- 2 常用电介质的临界电场强度 3-7
- 3 电场强度的计算 3-7
 - 3.1 最大电场强度的分析算法 3-8
 - 3.2 静电场的数值算法 3-11
- 4 静电场的模拟研究 3-12
 - 4.1 电解槽法 3-12
 - 4.2 导电纸法 3-14
- 5 静电场实测 3-14
 - 5.1 小球隙法测量电压分布 3-14
 - 5.2 平衡法(探针法)测量电压分布 3-14
 - 5.3 电容充电法(习称“抓”电压法)测量电压分布 3-15
- 6 电场的调整 3-15

第 3 章 气体绝缘的放电特性

- 1 气体放电的基本形式 3-17
 - 1.1 火花放电 3-17
 - 1.2 局部放电 3-18
 - 1.3 沿面放电(闪络) 3-18
- 2 气体放电的物理过程 3-18
 - 2.1 带电粒子的产生和消失 3-18
 - 2.2 火花放电的基本过程 3-18
 - 2.3 雷闪电放电 3-20
- 3 空气间隙的火花放电电压 3-21
- 4 影响火花放电电压的主要因素 3-24
 - 4.1 气体状态 3-24
 - 4.2 电压作用时间 3-24
 - 4.3 极性 3-25
 - 4.4 电场均匀程度 3-25
 - 4.5 其他影响因素 3-26
- 5 压缩空气、六氟化硫与高真空间隙的放电特性 3-26
 - 5.1 压缩空气的放电特性 3-26
 - 5.2 六氟化硫气体间隙的放电特性 3-28
 - 5.3 高真空间隙的放电特性 3-29
- 6 电晕放电 3-30
 - 6.1 形成条件 3-30
 - 6.2 电晕噪音及无线电干扰 3-31
 - 6.3 电晕放电的防止与应用 3-32
- 7 气体中的沿面放电 3-32
 - 7.1 沿面放电 3-32
 - 7.2 滑闪放电及其防止 3-33
 - 7.3 淋雨状态的沿面放电(湿闪) 3-34
 - 7.4 污秽表面的沿面放电(污闪) 3-35

第 4 章 液体绝缘的击穿特性

- 1 液体绝缘的击穿过程 3-36
- 2 液体绝缘的击穿电压 3-36
 - 2.1 工频击穿电压 3-36
 - 2.2 冲击击穿电压 3-37

3-VI 目 录

3 影响击穿电压的主要因素	3-37
3.1 杂质	3-37
3.2 压力	3-38
3.3 温度	3-38
3.4 电场均匀程度	3-39
3.5 电压作用时间	3-39

4 油中沿面放电	3-39
4.1 电力线与分界面平行	3-40
4.2 电力线与分界面斜交	3-40

5 油—屏障绝缘	3-41
5.1 覆盖层	3-41
5.2 绝缘层	3-41
5.3 屏障	3-41
5.4 多重屏障	3-42

第5章 固体绝缘的击穿特性

1 固体绝缘的击穿过程	3-42
1.1 电击穿	3-42
1.2 热击穿	3-42
1.3 电化学击穿	3-42

2 影响固体绝缘击穿电压的主要因素	3-43
2.1 电压作用时间	3-43
2.2 温度	3-43
2.3 电场均匀程度	3-44
2.4 潮湿	3-44
2.5 机械负荷	3-44
2.6 电压的种类	3-44
2.7 累积效应	3-44
2.8 电极面积、周围媒质	3-44

3 油纸绝缘的击穿电压	3-45
-------------------	------

4 影响油纸绝缘击穿电压的主要因素	3-45
4.1 电压作用时间	3-45
4.2 电压类型	3-45
4.3 介质厚度	3-45
4.4 油压	3-46
4.5 电极面积	3-46
4.6 频率	3-46
4.7 温度	3-46
4.8 潮湿	3-46

4.9 局部放电	3-46
----------------	------

第6章 高电压试验设备

1 工频电压试验设备	3-47
1.1 工频试验设备的输出电压	3-47
1.2 工频试验设备的输出电流	3-47
1.3 工频试验设备运行时间	3-48
1.4 保护电阻	3-48
1.5 滤波装置	3-48
1.6 调压设备	3-48
1.7 工频电压试验设备实例(表3-6-4)	3-50
1.8 串联谐振试验设备	3-50

2 冲击电压发生器	3-51
2.1 冲击电压的波形	3-51
2.2 工作原理	3-52
2.3 充电回路	3-53
2.4 放电等值回路	3-53
2.5 1.5/40微秒波形的经验公式	3-53
2.6 发生器效率 η	3-53
2.7 级电压 U' 和电容 C	3-53
2.8 绝缘	3-53
2.9 波前电阻和波长电阻	3-53
2.10 充电变压器参数	3-54
2.11 整流阀	3-54
2.12 启动间隙	3-54
2.13 示波器启动方法	3-55
2.14 截波产生方法	3-55
2.15 调整要点	3-55
2.16 冲击电压发生器实例	3-56

3 操作波电压发生器	3-57
3.1 操作波电压的波形	3-57
3.2 用冲击电压发生器产生操作波	3-57
3.3 用变压器产生操作波	3-58
3.4 复合波形操作波产生方法	3-59

4 直流电压发生器	3-59
4.1 主回路方案	3-59
4.2 电源频率 f	3-59
4.3 电压降 ΔU	3-59
4.4 倍压级数 n	3-59
4.5 级电容 C	3-59
4.6 变压器的高压侧电压 U_T	3-60

4.7	保护电阻 R_p	3-60
4.8	高电压硅串	3-60
4.9	直流电压发生器实例	3-62
5	冲击电流发生器	3-62
5.1	冲击电流的波形	3-64
5.2	工作原理及计算	3-64
5.3	回路电阻 R	3-64
5.4	回路电感 L	3-64
5.5	回路电容 C 值和充电电压 U_0 值	3-65
5.6	充电时间	3-65
5.7	电容器安装布置	3-65
5.8	热和机械力的考虑	3-65
5.9	点火间隙	3-65
5.10	充电变压器参数	3-65
5.11	整流阀	3-65
5.12	示波器启动方法	3-66
5.13	调整要点	3-66
5.14	冲击电流发生器实例	3-67

第7章 高电压测量技术

1	工频电压测量	3-67
1.1	球隙测量	3-67
1.2	静电电压表测量	3-69
1.3	电压互感器测量	3-69
1.4	利用变压器变压比测量	3-69
1.5	电容分压器测量	3-71
1.6	利用电容电流测量	3-71
2	冲击电压的测量	3-71
2.1	球隙测量	3-71
2.2	分压器测量系统	3-72
3	操作波电压的测量	3-76
4	冲击电流测量	3-76
4.1	分流器示波器测量系统	3-77
4.2	变流线圈、示波器测量系统	3-78
5	直流高压测量	3-78
5.1	直流电压平均值的测量	3-78
5.2	电压脉动系数测量	3-78
6	测量误差	3-79

第8章 高电压试验

1	一般试验条件	3-79
---	--------------	------

1.1	试品布置	3-79
1.2	接地体的影响	3-79
1.3	高压试验室的接地和屏蔽	3-79
1.4	建设高压试验室需注意的其他问题	3-79
2	高压电气设备绝缘试验电压标准	3-79
2.1	绝缘试验电压标准	3-79
2.2	国际电工委员会绝缘配合标准	3-81
3	气象校正系数	3-81
3.1	国家标准GB311-64规定	3-81
3.2	校正系数的参考数据	3-82
4	工频电压试验方法	3-83
4.1	耐压时间	3-83
4.2	升压速度	3-83
4.3	加压次数	3-83
5	冲击电压试验方法 (包括操作波 试验方法)	3-84
5.1	冲击电压试验要点	3-84
5.2	确定50%放电电压的方法	3-84
5.3	耐受电压 U_w 的确定	3-85
5.4	伏-秒特性试验	3-86
6	淋雨试验方法	3-86
6.1	国家标准规定	3-86
6.2	常用喷嘴	3-87
6.3	校正系数的参考数据	3-87
7	绝缘电阻和吸收比试验	3-87
7.1	试验目的及原理	3-87
7.2	试验方法	3-88
8	泄漏电流试验	3-89
8.1	测试线路	3-89
8.2	测试方法	3-89
8.3	试验结果的判断	3-89
9	介质损耗角正切 ($\tan \delta$) 试验	3-89
9.1	测试仪器和测试方法	3-89
9.2	保护电压	3-90
9.3	试验注意事项	3-90
9.4	试验结果的判断	3-90
10	局部放电试验方法	3-91
10.1	局部放电产生的原因	3-91
10.2	真实放电量 q 和视在放电量 Q	3-91
10.3	常用测试参数	3-91
10.4	局部放电测试回路	3-91

3-VII 目 录

10.5 测试阻抗 Z 上的脉冲电压 U_x	3-91	10.12 抗干扰措施	3-94
10.6 单个脉冲电压 U_x 的持续时间 T	3-92	10.13 产品的局部放电试验	3-94
10.7 测试回路的校正	3-92	11 高电压试验的安全技术	3-95
10.8 校正电容 C_0 值的选择	3-93	11.1 人身安全	3-95
10.9 对校正用方波发生器的要求	3-93	11.2 设备安全措施	3-96
10.10 测试仪器	3-93	11.3 设备安全距离	3-96
10.11 刻度系数校正	3-94		

常用符号表

C ——电容	U ——电压
C_m ——热容量	U_s ——气体放电电压
c ——表面比电容	U_b ——液、固体击穿电压
D ——电位移	$U_{50\%}$ ——50%放电电压
d ——距离	x ——电抗
E ——电场强度	z ——阻抗
f ——频率	α ——电子碰撞游离系数
H ——海拔高度	γ ——电导率；表面游离系数
I, i ——电流	δ ——空气相对密度
K ——过电压倍数；系数	ε ——介电常数
L ——电感	ε_r ——相对介电常数
N ——线圈匝数	ε_0 ——真空介电常数
P ——压力	η ——效率
$P\%$ ——概率	θ ——温升
Q ——品质因数	ρ ——电阻率
R ——电阻	σ ——标准偏差（真值）
r ——半径	φ ——电位
S ——距离	ω ——角频率
T ——时间；时间常数	

第1章 概 述

1 高电压技术的主要内容

高电压技术主要是随着高电压大电网的建设和高压电气设备的研制而发展起来的。现代大型发电厂多建在动力资源丰富的江河流域和燃料产地,距负荷中心往往较远。为了经济合理地实现大功率输电,提高输电电压是一个重要途径。目前,国际上交流输电电压已达765千伏,直流输电电压已达 ± 400 千伏,110和220千伏输电线路也已经引入城市和工业中心的变电站。为了压缩变电站的占地面积,全封闭组合电器发展较快。在这些方面都提出了不少特殊的高电压技术问题。此外,其他技术领域应用高电压技术的也日渐增多。

高电压技术的主要内容有下述几个方面。

1.1 绝缘特性的研究

高压电气设备应能承受住某些高电压的作用。高电压的主要类型有交流工作电压、直流工作电压、雷电过电压和内部过电压。为此,就需要研究电介质在各种类型高电压下的绝缘特性、耐电强度和放电机理,以便合理解决电气设备和电力系统的绝缘结构问题。超高压输电线路及电气设备在工作电压下的绝缘老化、局部放电、电晕、无线电干扰、噪音、静电感应等高电压技术问题的研究,也很重要。为了耐受内部过电压,空气长间隙的操作波放电特性也必须着重研究。

1.2 过电压及其保护措施的研究

雷电过电压和内部过电压对输电系统的绝缘是个严重的威胁。因此,研究这些过电压的特性和规律,制订限制措施,以便经济合理地确定输电线路及电气设备的绝缘水平,是高电压技术的又一主要内容。此外,高建筑物、通讯线路、天线、飞机、轮船、油库等防雷问题也是高电压技术的一个方面。

1.3 高电压试验设备和高电压测量技术的研究

为了在试验室研究电介质和电气设备的绝缘特性,需要研制各种类型的高电压发生器,主要有工频电压试验设备、冲击电压发生器、操作波电压发生器、冲击电流发生器和直流电压发生器等。高电压测量装置和测量技术是正确进行高电压试验的基础,也必须不断研究改进。

1.4 试验方法的研究

为了合理地进行高压电气设备的绝缘特性试验,制订正确的试验方法很重要,例如介质损耗角正切($\tan \delta$)试验、耐压试验、局部放电试验、淋雨试验等。高压电气设备外绝缘的耐电强度,受到气压、温度、湿度、风沙、污秽、雨水、射线等因素的影响而发生变化,找出它们的规律性,制订出不同条件下外绝缘耐电强度的换算办法和等效的试验方法,也是高电压技术研究的重要内容。

1.5 高电压技术在其他技术领域的应用

随着科学技术的飞速发展,高电压技术的应用范围日益扩大。目前,在基本粒子加速器、可控热核反应、激光技术、电子束加工、静电除尘、静电喷漆、静电复印、医疗器械、冲击加工成型或破碎、毫微秒方波等方面,都利用高电压技术解决某些特殊问题。

2 高电压的类型和特点

工程上,通常把1000伏以上的电压称为高电压。常遇到的高电压类型有直流电压、工频交流电压、冲击电压(持续时间在微秒级的电压,包括雷电和矩形波电压)以及高频电压(包括电力系统的内部过电压)。

2.1 直流和工频交流高电压

交、直流输配电系统及大多数电气设备的长期工作电压均属此种类型。这种高电压不仅会使设备绝缘游离老化、以致逐渐损坏,还会产生无线电干扰。

由于静电感应,在高电压电场中的不接地导体会感应产生高电压;若在交流高压电场内有接地导体,则有感应电流经导体流入大地。这种感应电压或感应电流都会危及设备和人畜的安全。例如,在高压输电线下面,当地面场强达到3千伏/米时,如无屏蔽措施,人就开始有不适感觉;场强再高,人就会有麻电、皮肤刺痛等感觉;当场强到达14~15千伏/米时,人就有较强烈的生理反应,工作困难。感应电压或电流与输电线的电压等级、被感应物体的大小及其与输电线的距离有关,可以通过计算或实验来确定。

为了人身及设备安全,在紧邻高电压电场的工作地点设置接地的金属屏蔽网是消除静电感应的有效措施。运输工具采用导电橡胶轮胎等办法,也可减小静电感应对人身安全的威胁。

2.2 雷电高电压

2.2.1 雷电的基本特征

云层在上升气流等的作用下形成带电荷的雷云。附近地面由于静电感应带有异号电荷。当雷云某处的电场强度达到空气的击穿场强时,雷云对地或者云对云之间就产生闪电。闪电主放电的电流很大,并伴有巨声和强光。云与地间的闪电中,负极性雷占绝大部分;雷电流从数千安到数百千安,其电流波形如图3-1-1所示。据统计,其波前时间多数为1.5~2

微秒,平均波长时间约30微秒,大于50微秒的很少。雷电流陡度超过7.5千安/微秒的约占一半。雷击房屋、树木、杆塔、天线等物体时,雷电流可使该物体烧毁;雷电流通过物体和土壤时产生的电压降落就是雷击高电

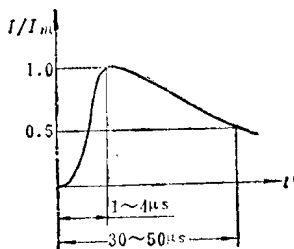


图3-1-1 雷电流波形图

压,它对波及范围内的物体及人畜会造成严重损伤。

2.2.2 电力系统中的雷电过电压

当雷云直接或间接对变电所或输电线路(如杆塔、导线、避雷针)放电而产生的冲击过电压统称雷电过电压,其幅值超过系统的额定电压。

a. 直击雷过电压 雷直击输电导线产生的过电压称直击雷过电压,它从着雷点沿导线向两侧传播,可能引起相间绝缘闪络,使邻相导线上出现波前很陡的过电压;电压行波进入变电站也可能损坏绝缘。

雷击避雷线(架空地线)或杆塔时,雷电流在其波阻抗及接地电阻上产生电压降;当电压降过高时,会击穿它与导线间的绝缘;由此在导线上产生的过电压叫做反击过电压。这种过电压的波前很陡,幅值也很高,有可能再引起相邻线的绝缘闪络。雷电流流过接地体时,在其周围地面形成很高的电位梯度可能危及人畜。

在直击雷过电压中,以直击输电线的过电压为最高。

当雷电过电压使管式避雷器或保护间隙动作时,则导线上的过电压将从某幅值迅速降至零值附近;这种电压波叫冲击截波,如图3-1-2b所示,对电气设备绕组的纵绝缘威胁很大。

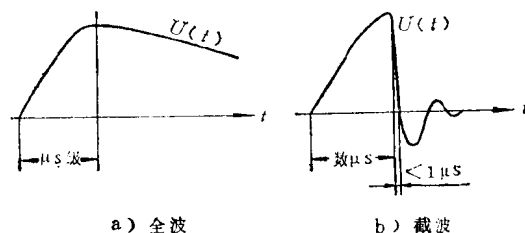


图3-1-2 冲击高电压波形图

b. 感应过电压 在闪电先导阶段,在附近的杆塔、避雷线和经变压器中性点接地的输电导线上感应出异号的束缚电荷。如果输电线附近的地面遭到雷击,束缚电荷在闪电主放电阶段突然变为自由电荷;它沿导线向两侧移动形成的过电压叫做感应过电压。这种过电压多数为正极性,波前时间约10微秒,其幅值在三相导线上基本相同,可能达到300~500千伏,并引起工作电压110千伏以下的设备绝

缘闪络。

雷电主放电通道周围磁场的迅速变化，会在邻近的输电导线上感应出过电压，但因落雷点紧靠线路的几率极小，这种过电压一般可不考虑。

2.2.3 冲击高电压

这种高电压是冲击电压发生器产生的，有全波和截波两种，其波形如图 3·1-2 所示。

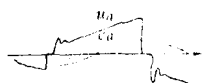
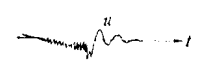
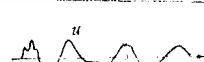
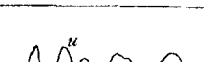
2.3 电力系统的内部过电压

电力系统由于正常操作、故障或其他原因从一

种状态过渡到另一种状态时，电磁能在系统内部发生振荡而引起的过电压，统称内部过电压。其中持续时间相当长而且无阻尼或弱阻尼的过电压叫做暂态过电压，这是持续的或有几个连续出现峰值的过电压，它对避雷器参数和系统绝缘水平的确定起着重要的作用。其中衰减很快、持续时间较短的过电压称为操作过电压，这类过电压常常起因于断路器的操作。内部过电压幅值与系统的最高运行电压幅值之比，称为内部过电压倍数 (K)。

各种内部过电压的主要特征见表 3·1-1 所

表3·1-1 内部过电压的特征

过电压名称		过电压倍数 K	持续时间	主要限制措施	典型波形	
暂态	单相故障接地	1.1~1.3	0.1~1 s	采用速断继电保护； 采用并联电抗器；		
	甩负荷	1.2~1.3	0.1~10 s	改善发电机调速装置和电压调整器的特性		
	电弧接地	1~3.5		中性点装消弧线圈		
过电压	线性谐振	1~3	0.1~100 s	断路器三相同期动作；改变电力网中的参数避免形成谐振		
	空载线末端电压升高	1~1.4	0.1~100 s	线路采用并联电抗器		
	铁磁谐振	1~3.5	~1 s	选择励磁特性较好的电压互感器，并在开口三角形上加阻尼电阻；改变运行方式		
	参数谐振	1~3		发电机参数容量大于空载线充电的功率；速动过电压保护切除电动机		
	开断电感性负荷	1~4	0.2~40 ms	采用阀式避雷器；断路器断口装并联电阻		
操作过电压	合空载线	1~3	5~100 ms	断路器断口并联低值或中值电阻；保证断路器三相同期动作；线路并联电抗器；采用通流能力大的阀式避雷器		
	重合空载线	1~3.5	5~100 ms			
	电 压	切断空载线	1~3.5		5~100 ms	

2.3.1 单相故障接地过电压

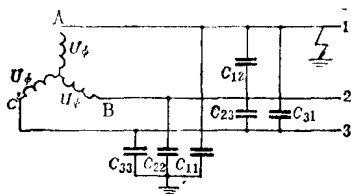
电力系统发生单相接地故障时, 零序电流在线路阻抗上产生压降而使健全相对地电压升高。这种现象就是单相故障接地过电压。它的过电压倍数与系统的零序阻抗及故障点的接地电阻有关。

2.3.2 甩负荷过电压

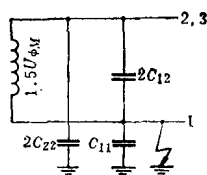
系统突然失去负荷时, 由于输电线路的电容电流对发电机有助磁作用和发电机转速增加, 使系统电压升高。这种现象就是甩负荷过电压。

2.3.3 电弧接地过电压

在中性点不直接接地的三相系统中, 若发生单相电弧接地故障 (见图3-1-3), 流过故障点的电流是另外两相的对地电容电流; 由于电流值一般很小, 往往不能形成稳定电弧。产生最严重的过电压情况如下所述。故障相 (例如A相) 的相电压在最大时 (例如正峰值 $U_{\phi M}$) 发弧, B和C相的对地电压要从 $-0.5U_{\phi M}$ 突变到 $-1.5U_{\phi M}$; 在过渡过程中, 有变压器和线路的电感与线路电容形成的高频振荡电流流过故障点; 若B和C的对地电压变到 $-1.5U_{\phi M}$ 时, 高频振荡电流恰好第一次过零而使故障点电弧熄灭, 则三相导线上的电荷在熄弧后将重新分布而使整个三相系统获得一个负直流电压; 半个工频周期后, A相电压为 $-U_{\phi M}$ 与负直流电压之和, 若故



a) 三相系统原理图



b) 等值单相图

图3-1-3 电弧接地原理图

C_{11} 、 C_{22} 、 C_{33} —导线对地电容

C_{12} 、 C_{23} 、 C_{31} —导线相间电容

U_{ϕ} —系统相电压

障点再次发生电弧接地, 则产生与前述相似的过程; 由于系统中留存上次的负电荷, 高频振荡电流加大, 于是这一次可以使整个系统获得更高的正直流电压。这样, 电弧时熄时现, 由于系统内电磁能的积聚, 在故障相和健全相都可能出现很高的过电压。

实际上, 故障相电弧接地不一定都在对地电压最大值时发生, 高频电流也不一定都在第一次过零时使故障点电流熄灭, 再加上导线和电弧本身消耗能量, 电弧接地过电压一般不超过 $3 \sim 3.5$ 倍。

2.3.4 谐振过电压

在某些运行状态下, 系统的固有频率如果恰与电源频率相同, 电容和电感元件上就会突然出现过电压。这种现象称为谐振过电压。

a. 线性谐振过电压和电容效应 输电线路可用图3-1-4的LC串联回路来表示, 线性回路的固有频率 $f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$; 若满足电源频率 $f = f_R$

条件就发生线性谐振, 谐振时 $I = \frac{e}{R}$; 由于R很小, I值可能很大, 结果在电感和电容上出现很高

过电压。这种现象叫做线性谐振。在实际电路中, 只要回路的固有频率与电源频率接近, 电容和电感上的电压就会升高, 这种现象称为电容效应。在电力系统中, 当电源容量较小和空载线路较长时, 由于电容效应, 线路上的电压, 尤其是线路末端的电压, 就会高于电源电

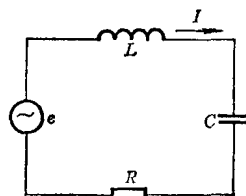


图3-1-4 系统线性谐振等值回路

e—交流电源电压(频率为f) L—线路电感
C—线路电容 R—导线电阻 I—回路电流

压。长线电容效应往往助长内部过电压幅值上升, 因此, 它对确定线路和变电所的绝缘水平有重要意义。

b. 铁磁谐振过电压 图3-1-5 a中的L代表系统中的变压器、电压互感器等具有铁心的非线性电感, C代表系统中的电容。在图3-1-5 b中, C和L的伏安特性分别由曲线1和2表示; 曲线3是这两条曲线的差值 ($U = U_C - U_L$), 也就是整个回路的伏安特性曲线。当 $|U_L| = |U_C|$ 时, 曲线1和2交于谐振点e, 电流为 I_0 ; 当 $|U_L| > |U_C|$ 时,

2.3.7 切断空载线路的过电压

切断空载线路时过电压的发展过程如图 3-1-8 所示。切断前, 线路上的电容电流 i_c 领先于工频电源电压 (U) 90° 。当 $t = t_1$ 时, 设 i_c 过零, 将线路和电源断开, 由于导线上的电荷无处可流, 将使导线维持在电位 $+U_{\phi M}$ 上不变。当电源电压变到 $-U_{\phi M}$ 时, 开关断口上的电压达到 $2U_{\phi M}$ 而可能重燃。重燃后, 导线上的电压将从起始值 $+U_{\phi M}$ 朝新的稳态值 $-U_{\phi M}$ 变化, 而其瞬态最大值将达到 $-3U_{\phi M}$ 。伴随瞬态过程的高频振荡电流 i_h 若在 $t = t_2$ 时过零而熄弧, 导线上就获得 $-3U_{\phi M}$ 的电压。

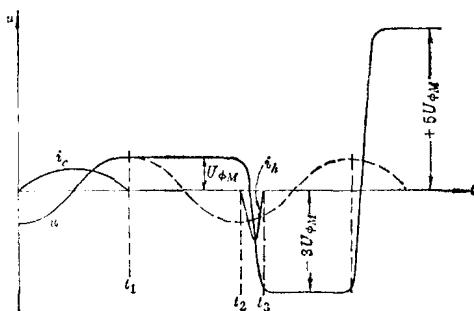


图3-1-8 切断空载线路的过电压的发展过程

这种过程如果重复下去, 线路上将产生 $+5U_{\phi M}$ 甚至更高的过电压。但实际上, 断路器往往只发生一次重燃, 并且重燃不一定在工频电源电压达到最大值时发生, 同时, 线路电阻和电晕损耗都限制过电压的发展, 实测的最大过电压为 $U_{\phi M}$ 的 3~4 倍。

2.3.8 操作波电压

为了考核电气设备耐受操作过电压的能力, 在试验室内用操作波发生器产生操作波电压来模仿系统中出现的操作过电压。国际电工委员会规定的操作波标准波形是 250/2500 微秒。选择波前时间 250 微秒是考虑到它对设备考核较严。此外, 还推荐 100/2500 微秒、500/2500 微秒的波形和振荡波在某些场合下使用。

2.4 其他类型高电压

在某些技术领域内, 需要使用矩形波电压, 它的前沿和后沿时间都小到毫微秒级。这种电压的产生和测量比微秒级的冲击电压要复杂得多。它的应用场合日益广泛, 值得研究。

电气设备试验中有时也使用中高频电压, 例如变压器在感应电压试验时承受的电压。在广播及电讯设备中, 则广泛应用高频高电压。

第2章 高压静电场

电气设备的绝缘, 应在保证安全运行的前提下作到经济合理。绝缘上的电场强度过高往往是绝缘损坏的原因。工程上, 分析解决高压电场问题的主要目的, 是在特定的电压和绝缘条件下, 如何使最高电场强度不超过规定值。

和超高频的电压变化速度比较, 绝大多数电气设备上的电压变化都很慢; 和电磁波的传播速度比较, 则电磁波在设备中的波过程可以忽略不计。因此, 绝大多数电气设备中的电场, 在任一瞬间都可看作“准静态”电场或近似地看作静电场 (参见本手册电工基础篇)。工程上还可以忽略某些次要因素以简化计算。

1 工程上常遇到的静电场问题

1.1 均匀电场与不均匀电场

电场强度的大小和方向在各处都相同的电场称为均匀电场, 如平板电容器极板中间部分的电场, 见图 3-2-1 a。其他情况, 统称不均匀电场。按不均匀程度的差别, 常分为稍不均匀电场和极不均匀电场。前者如球间隙距离不大于球半径的球隙电场, 见图 3-2-1 b; 后者如棒板间隙的电场, 见图 3-2-1 c。棒对棒间隙的电场是对称的不均匀场, 但比棒板间隙的电场要均匀些。图 3-2-1 d 是尖端效应产

生的不均匀电场。分析绝缘结构的击穿电压时,不仅要考虑绝缘距离,还要考虑电场不均匀程度的影响。间隙距离相同时,电场愈不均匀,击穿电压愈低。

电气设备中的电场多为不均匀场,为了提高绝缘结构的耐电强度,必须设法减小其不均匀度。

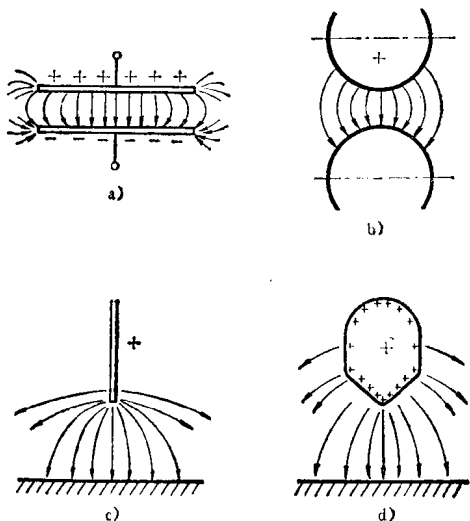


图3-2-1 均匀电场和不均匀电场

1.2 边缘效应与尖端效应

导体表面的电场强度,与其表面电荷密度成正比。在电极的边缘或尖端(见图3-2-1 a, d),由于曲率半径最小,表面电荷密度最大,电场强度最高,容易发生局部放电。这种现象称为边缘效应与尖端效应。所以,不论电极处于高电位还是接地,必须改善电极形状,避免曲率半径过小或出现尖角。

1.3 多层电介质中的电场分布

由不同介电常数(ϵ)的电介质组成多层绝缘时,因为分界面上不存在自由电荷,分界面上两侧的电场强度(E_1, E_2)会出现不连续的变化,他们的切线分量相等,但其法线分量(E_{1n}, E_{2n})与电位移的法线分量(D_n)保持 $D_n = \epsilon_1 E_{1n} = \epsilon_2 E_{2n}$ 的关系^①。可见,在分界面处,电场强度的大小和方向都发生突变(见图3-2-2): ϵ 大的电介质中, E 值小; ϵ 小的电介质中, E 值大。因此,在应用多层电介质绝缘时要注意:引入 ϵ 大的电介质会使 ϵ 小的电介质中的电场强度上升,因之有可能使 ϵ 小的电

介质遭到损伤。

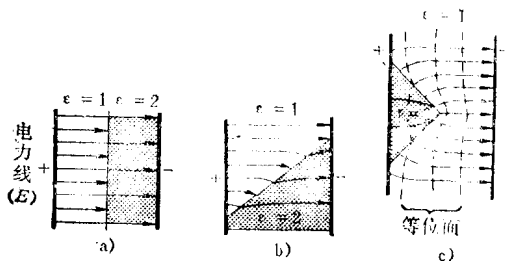


图3-2-2 平板电极间二层电介质中的电力线分布图
a—介质交界面与电力线垂直 b—介质交界面与电力线成角度 c—绝缘角状物对电场造成的畸变

1.4 静电感应

不接地的导体在电场中会具有一定电位,它随电场的变化而变化;这种现象叫静电感应。感应的强弱与电场的强弱及变化速度、被感应导体的大小及位置等因素有关。静电感应会引起各种问题,例如改变产品的某些特性、影响测量准确度、产生干扰信号、危及人身安全等。在高电压领域,它的影响尤为严重。利用屏蔽、接地等办法可以减小静电感应的影响。另一方面静电感应现象也可以用来解决一些生产上的问题,如静电复印、喷涂、除尘等等。

2 常用电介质的临界电场强度

电介质中的电场强度超过某一定值时,该介质就会部分(在不均匀电场中)或全部(在均匀电场中)地失去绝缘性能,这个数值叫做该介质的临界电场强度 E_c (简称临界场强)。它与电极形状、极距、散热等条件有关,在一定范围内变动。工程上在按照 E_c 值选取使用电压时,应注意使其有较大裕度。

常用电介质的临界场强如表3-2-1所列。

3 电场强度的计算

高压静电场的计算方法,可分为分析计算法和数值计算法两大类。分析计算法适用于电极表面可用简单数学函数表示的电场;准确计算很复杂时,还可以用近似计算以满足一般工程的需要。数值计算法可以解决复杂的电场问题,准确度高;由于采

^① 假定介电常数 ϵ_1 和 ϵ_2 是各向同性的。

表3-2-1 常用介质的临界场强

材料名称		相对介电常数 ϵ_r	临界场强① E_c kV/cm	说明
气体 (标准 状态下)	空气	1.00058	25~30	E_c 指 峰值
	六氟化硫	1.002	≈80	
	氮	1.006	25~30	
	二氧化碳	1.00098	22~27	
液体	变压器油	2.3~2.5	50~250	E_c 值 与所含杂 质有关
	硅油	2.6	100~200	
	四氯化碳	2.2	≈600	
固体	石蜡	2~2.5	100~150	E_c 值 因产品型 号及其制 造工艺不 同而有差 别
	瓷	5.5~6.5		
	聚乙烯	2.2~2.4	200~300	
	聚苯乙烯	2.5~2.6	200~300	
	聚四氟乙烯	2~2.2	200~300	
	聚氯乙烯	3~3.5	100~200	
	有机玻璃	3~3.6	200~300	
	环氧树脂浇铸品	3.8	200~300	

① 在说明栏中未特别注明者均指有效值。

用电子计算机可以解决复杂繁重的计算工作量问题，所以采用数值算法日益广泛。

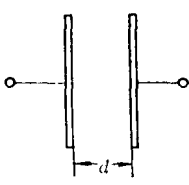
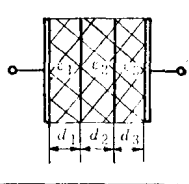
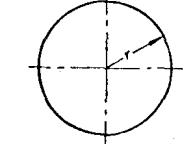
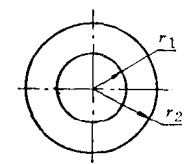
3.1 最大电场强度的分析计算法

绝缘结构中的电场分布常常是相当复杂的。为了检查电介质中的最大电场强度是否超过临界场强，也为了选择电极形状和绝缘结构，工程上常需要算出电介质中的最大电场强度。为此目的，计算时常用形状简单的电极代替实际的电极，并引进某些校正系数。取代电极时，须保持最大场强点附近的电场基本不变。

3.1.1 最大场强计算式

常见典型电场的最大场强计算式列于表3-2-2。其中 U 指电极间的电压（千伏），长度（ d 、 d_1 、 d_2 、 d_3 、 r 、 r_1 、 r_2 、 R 、 l 、 H 、 D ）的单位一律用厘米，介电常数 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_r \times 8.86 \times 10^{-14}$ 法/厘米， ϵ_r 是相对介电常数。

表3-2-2 最大场强计算式

电极形状	最大电场强度 $E_{\max}$ kV/cm	电 容 C F	应用场合 (例)	备 注
1 板对板 	$\frac{U}{d}$	$\frac{\epsilon S}{d}$	平板电容器	S 为单块平板面积(cm^2)， $d \ll S$ ，不考虑边缘效应； $\epsilon_{\min}$ 指 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 中最小的一个值
2 板对板 (多层介 质，以3 层为例) 	$\frac{U}{\epsilon_{\min} \left(\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3} \right)}$	$\frac{S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \frac{d_3}{\epsilon_3}}$	多层电 介质组 成的平 板间 隙	
3 孤立球 	$\frac{U}{r}$	$4\pi\epsilon r$	高压设 备顶罩	
4 同心球 	$\frac{U r_2}{r_1(r_2 - r_1)}$	外球接地 $\frac{4\pi\epsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1}$ 内球接地 $\frac{4\pi\epsilon r_2}{r_2 - r_1}$	充气式 标准电 容器的 端部	