

电机工程手册
第29篇 电力电容器
(试用本)

电机工程手册

第29篇 电力电容器

(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

73.21073/210

社

73.21073
210
29:1

电机工程手册

第29篇 电力电容器

(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

本书着重介绍各类常用电力电容器(移相、串联、电热、耦合、脉冲、直流、滤波和标准电容器等)的性能、结构、设计、制造工艺、试验和使用。

电机工程手册
第29篇 电力电容器
(试用本)
西安电力电容器厂 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)

上海商务印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16·印张 4 3/4·字数 124千字
1978年11月上海第一版·1978年11月上海第一次印刷
印数 00,001—63,000册·定价 0.39元

统一书号: 15033·4510

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29篇,由西安电力电容器厂主编。参加编写的有桂林电力电容器厂、西安交通大学等单位。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助,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

常用符号表

b_{jb} ——极板宽度	n_m ——元件中薄膜层数
b_y ——元件宽度	n_p ——元件中纸层数
C ——电容	P_a ——导体损耗功率
C_b ——标称电容	P_j ——介质损耗功率
C_{ch} ——串联组电容	P_q ——无功功率
C_y ——元件电容	P_{qe} ——额定无功功率
C_{yb} ——元件标称电容	P_s ——损耗功率
D_p ——平均直径	Q ——流量
D_e ——芯轴直径	R_j ——绝缘电阻
d_j ——极间介质厚度	$\operatorname{tg} \delta$ ——损耗角正切
d_{jb} ——极板厚度	$\operatorname{tg} \delta_f$ ——复合介质损耗角正切
d_m ——单层薄膜厚度	$\operatorname{tg} \delta_m$ ——薄膜损耗角正切
d_y ——元件厚度	$\operatorname{tg} \delta_{ys}$ ——液体介质浸渍纸损耗角正切
d_z ——单层纸厚度	U_c ——电容器端电压
E ——电场强度	U_e ——额定电压
E_j ——击穿场强	U_j ——击穿电压
$E_{j,l}$ ——局部放电场强	x ——厚度比值
E_p ——平均场强	α ——系数; 比值
f_s ——额定频率	β ——比值
I_s ——额定电流	γ ——体积膨胀系数
I_l ——漏导电流	ϵ ——介电系数
k ——压紧系数	ϵ_f ——复合介质介电系数
l_{jb} ——极板长度	ϵ_{ys} ——液体介质浸渍纸介电系数
l_y ——元件长度	λ ——导热系数
N ——元件总数	ρ ——密度
N_{ch} ——串联元件组数	ρ_v ——体积电阻系数
n ——元件中介质层数	σ ——应力

目 录

编辑说明
常用符号表

第1章 概 述

- 1 电力电容器的分类和用途29-1
- 2 电容器的基本概念29-4
 - 2.1 电容器的电容29-4
 - 2.2 电容器的储能29-4
 - 2.3 电容器的无功功率(容量)和损耗功率29-4
 - 2.4 电容器的储能因数29-4
 - 2.5 交流电容器的补偿作用29-5
- 3 关键技术和发展方向29-5
 - 3.1 提高介质性能,发展采用新介质29-5
 - 3.2 改进制造工艺,提高自动化水平29-6
 - 3.3 改进产品结构,发展超高压及成套产品29-6

第2章 电力电容器的介质

- 1 电容器介质的电气性能29-6
 - 1.1 介质的极化和介电系数29-6
 - 1.2 体积电阻系数和自持放电时间常数29-6
 - 1.3 介质的损耗29-8
 - 1.4 介质的耐电强度29-8
 - 1.5 局部放电和介质的老化29-9
- 2 气体介质29-10
- 3 液体介质29-10
 - 3.1 电容器油29-10
 - 3.2 苯甲基硅油29-13
 - 3.3 蓖麻油29-13
 - 3.4 十二烷基苯29-13
 - 3.5 酯类油29-13
- 4 固体介质29-13
 - 4.1 电容器纸29-13
 - 4.2 塑料薄膜29-15
 - 4.3 金属化纸和金属化薄膜29-16
- 5 组合介质29-16

- 5.1 组合介质电气性能参数计算29-16
- 5.2 各种因素对组合介质电气性能的影响29-16

第3章 电力电容器的设计

- 1 设计的基本原则29-22
 - 1.1 设计依据29-22
 - 1.2 产品基本结构29-22
 - 1.3 介质和极板的选择29-23
 - 1.4 元件有关参数及尺寸29-24
 - 1.5 芯子设计29-25
 - 1.6 外壳设计29-26
- 2 常用计算公式和计算方法29-26
- 3 几种电容器设计中的特殊问题29-36
 - 3.1 电热电容器的温升计算29-36
 - 3.2 耦合电容器的机械强度和浸渍剂体积补偿计算29-36
 - 3.3 脉冲电容器的电感计算29-37
- 4 高压标准电容器设计29-37

第4章 电力电容器的制造工艺

- 1 外壳焊接工艺29-41
- 2 瓷套金属涂敷工艺29-42
- 3 芯子制造29-43
 - 3.1 元件卷制29-43
 - 3.2 芯子压装29-43
 - 3.3 芯子引线29-44
 - 3.4 芯子预烘29-44
- 4 装配29-44
- 5 浸渍剂的净化处理29-45
- 6 真空干燥浸渍处理29-46

第5章 电力电容器的试验

- 1 试验种类和项目29-47
- 2 常用试验方法29-47
- 3 热平衡图及其分析29-47

4 专用试验方法	29-54	2 串联电容器的使用	29-62
5 研究性试验	29-56	3 电热电容器的使用	29-62
第6章 电力电容器的使用			
1 移相电容器的使用	29-57	4 耦合电容器的使用	29-63
1.1 补偿容量的确定与计算	29-57	5 脉冲电容器的使用	29-63
1.2 使用条件	29-57	6 标准电容器的使用	29-63
1.3 使用及维护中的安全要求	29-58	附录 I 电力电容器代表产品的主要 技术数据	29-64
1.4 电容器的保护及接线方式	29-60	附录 II 电力电容器的有关技术标准 名称及编号	29-67
1.5 维护保养要点	29-61	附录 III 移相、耦合、均压电容器的各项 耐压试验电压值	29-67
1.6 电容器常见故障产生原因及处理 方法	29-61	参考文献	29-67
1.7 移相电容器用于感应发电装置	29-61		

第1章 概述

电力电容器在电力系统、工业生产设备、高压试验及现代科学技术中的应用十分广泛。根据不同的使用要求, 现已发展形成了许多类型和品种。

性能特点和接线示意图如表 29.1-1 所示。此外, 以某些电力电容器为基础, 可以发展成多种成套装置, 如电容式电压互感器、冲击电压和冲击电流发生装置等。几种主要电力电容器及有关成套装置的外形见图 29.1-1; 各种电容器和成套装置的代表性产品的主要技术数据见附录 I。

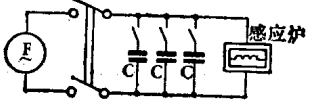
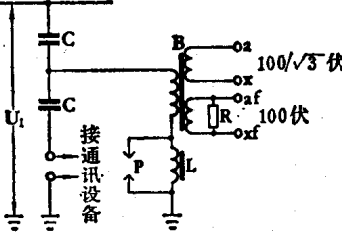
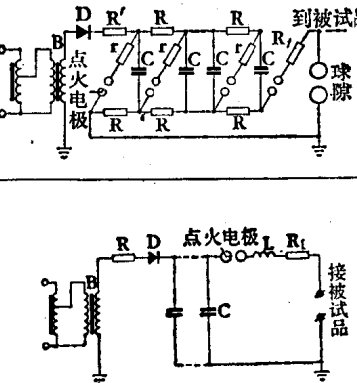
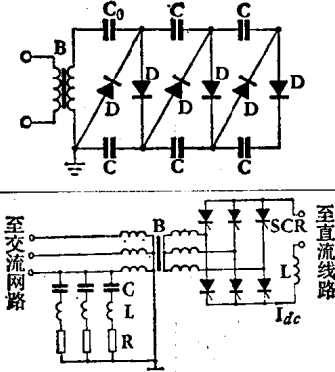
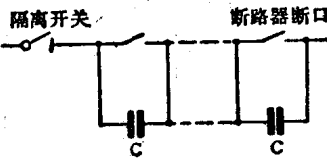
1 电力电容器的分类和用途

电力电容器按用途不同可分为九大类, 其用途、

表 29.1-1 电力电容器的分类、用途和接线示意图

产品类型	主要用途	性能特点	电气接线示意图	简要说明
移相电容器	1. 补偿电力系统感性负荷无功功率, 以提高功率因数, 改善电压质量, 降低线路损耗 2. 与感应电动机定子绕组并联, 构成自激运行的异步发电装置	能长期在工频交流额定电压下运行, 且能承受一定的过电压		移相电容器的几种使用方式和安装地点: ① 并联接于 6.3、10.5 及 35 千伏等高压配电网 ② 集中并联接于 400 伏低压汇流母线上 ③ 分组并联接于各低压配电线上 ④ 与单台感应电动机并联, 作分散补偿 图中 C—移相电容器 RD—熔断器 B—变压器 DL—断路器
				图为电力系统中用的静止补偿装置。其反应速度快, 可以自动调整功率因数, 并可供给输电线路无功功率, 以控制电压及增加系统稳定性 图中 C—电容器 L—电抗器 SCR—可控硅元件
				图中 D—感应电动机 C—电容器 RD—熔断器
串联电容器	串联接于工频高压输、配线路中, 用以补偿线路的分布感抗, 提高系统的静、动态稳定性, 改善线路的电压质量、加长送电距离和增大输送能力	单台额定电压不高; 可承受比移相电容器高的过电压		图为广泛用于输、配线路的串联补偿装置的一相简化接线图 图中 GK ₁ 、GK ₂ 、GK ₃ —隔离开关 C—串联电容器 P—保护间隙 R—阻尼电阻 L—阻尼电感

(续)

产品类型	主要用途	性能特点	电气接线示意图	简要说明
电热电容器	用于频率为40~24000赫的电热设备系统中,以提高功率因数,改善回路的电压或频率等特性	电流和无功功率大,损耗功率也大		电热电容器C与工频或中频感应电炉并联运行
耦合电容器	高压端接于输电线上,低压端经过耦合线圈接地,使高频载波装置在低电压下与高压线路耦合,实现载波通讯以及测量、控制和保护	能长期在额定工频电压和相应的系统最高工作电压下运行,在系统的内外过电压下,有较高的安全裕度,同时能通过40~500千赫的载波讯号		耦合电容器用于电容式电压互感器及高频通讯系统中 图中 C ₁ 、C ₂ —分别为电容分压器的主电容及分压电容 L—共振电抗器 B—变压器 R—阻尼电阻
脉冲电容器	用于冲击电压和冲击电流发生器及振荡回路等高压试验装置,此外,还可用于电磁成型、液电成型、液电破碎、储能焊接、海底探矿以及产生高温等离子、超强冲击电流和超强冲击磁场、强冲击光源,激光等装置中	<ol style="list-style-type: none"> 1. 用较小功率的电源进行较长时间充电,在很短时间内放电,可以得到很大的冲击功率 2. 一般为间断运行,多以放电次数计算使用寿命,也有长期连续充放电的 3. 固有电感低的产品,可得到波前陡度大,峰值高的放电电流或高的振荡频率 		<p>图为冲击电压发生器的线路简图,利用电容器C并联充电和串联放电,能得到高达几千伏的冲击电压 图中: R₁—调波电阻 D—二极管</p> <p>图为冲击电流发生器的线路简图,当主电容C充电至一定电压后,通过球隙、调波电感L、调波电阻R₁对被试品放电,能产生高达几百千安的冲击电流</p>
直流和滤波电容器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 用于倍压或串级高压直流装置中 2. 用于高压整流滤波装置中 3. 用于交流滤波装置中,包括直流输电的滤波装置 	<p>直流电容器能长期在直流电压下或在含有一定交流分量的直流线路上工作</p> <p>交流滤波电容器主要用以滤去工频电流中的高次谐波分量</p>		<p>图为电容器用于串级直流设备上</p> <p>图为直流输电系统中交流/直流变换原理图,其中C为接于一相上的交流滤波电容器</p>
均压电容器	并联接于断路器断口上,使各断口间的电压在开断时均匀	受电压作用的时间不长,但当断路器动作时,可能受到较高的过电压		图为均压电容器C接于高压空气断路器的断口上

(续)

产品类型	主要用途	性能特点	电气接线示意图	简要说明
防护电容器	接于线、地之间,降低大气过电压的波前陡度和波峰峰值,配合避雷器保护发电机和电动机	长期在工频交流电压下运行,能承受较高的大气过电压,安全裕度大		图为防护电容器C作发电机F的保护装置 图中 FB ₁ —阀式避雷器
标准电容器	用在工频高压测量介质损耗回路中,作为标准电容,或用作测量高压的电容分压装置	介质损耗角正切值小,电容值准确而稳定		图为西林电桥原理图,其中C ₀ 为充气式标准电容器,其工频额定电压可高达1000、1200千伏及以上

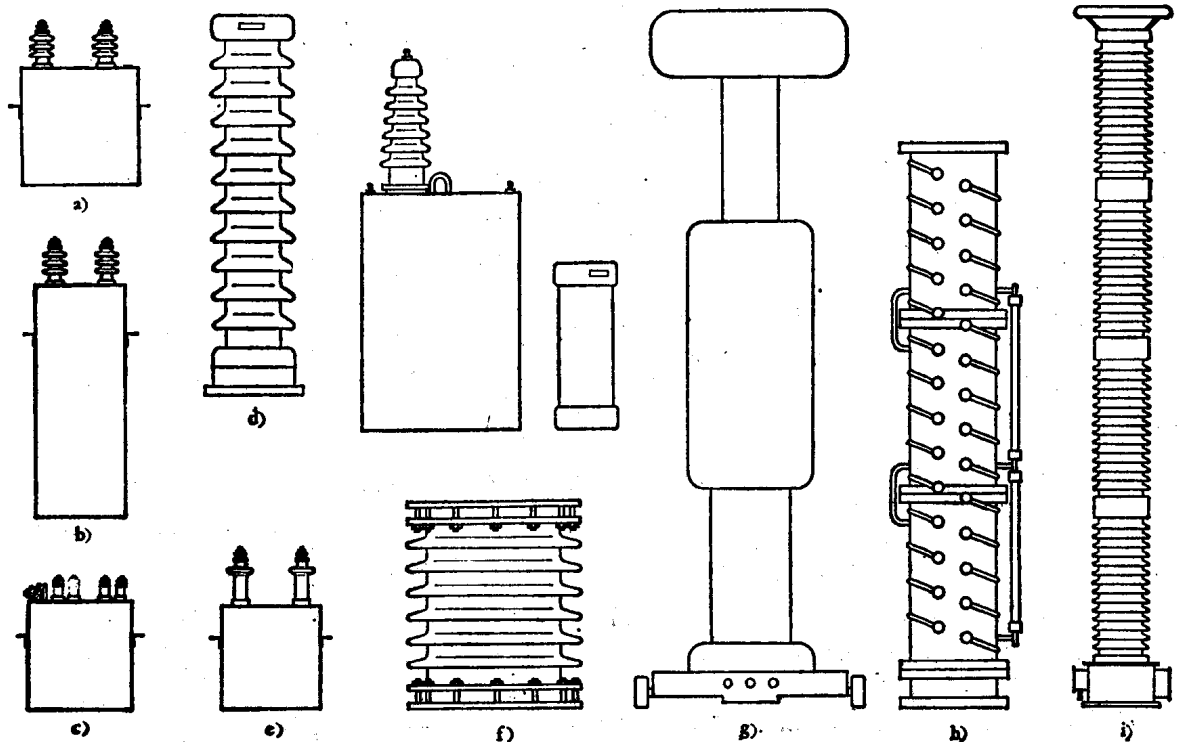


图 29-1-1 几种主要电力电容器及成套装置外形图

- a—移相电容器 b—串联电容器 c—电热电容器 d—耦合电容器 e—滤波电容器 f—脉冲电容器
g—标准电容器 h—冲击电压发生器 i—750 kV 电容式电压互感器

2 电容器的基本概念

2.1 电容器的电容

电容器通常是由两块中间隔以绝缘材料(也称电介质)的导电板组成,在电场作用下,极板上有储积电荷的能力。

用直流电压 U 对电容器充电时,极板上将分别储积电荷 $+Q$ 和 $-Q$,电荷量 Q 与电压 U 成正比,其比值称为这一电容器的电容,即

$$C = \frac{Q}{U} \quad (29.1-1)$$

式中 U ——电压 V
 Q ——电荷量 C
 C ——电容 F

电容器的电容决定于它的几何尺寸(即极板面积和极间介质厚度)及介质的介电系数。如图 29.1-2 所示,平板电容器的电容

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \text{ F} \quad (29.1-2)$$

式中 ϵ_0 ——真空的介电系数,为 8.86×10^{-14} F/cm
 ϵ ——介质的相对介电系数(常简称为介电系数)
 S ——极板面积 cm^2
 d ——介质厚度 cm

电力电容器通常用铝箔作极板,采用卷绕式扁平形元件。在这种结构中,由于极板双面起作用,其电容值约等于该元件展开成平面长条时的二倍,即

$$C \approx 2 \times 8.86 \times 10^{-14} \frac{\epsilon b l}{d} \text{ F} \quad (29.1-3)$$

式中 b ——铝箔宽度 cm
 l ——铝箔长度 cm
 d ——元件极间介质厚度 cm

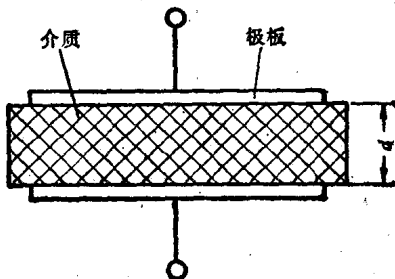


图 29.1-2 平板电容器原理图

由上式可知,为了使电容器做到容量大,而尺寸小、重量轻,宜采用高介电系数的介质。

2.2 电容器的储能

当电容器在直流电压下充电时,在介质的电场中即储积能量。当电容器放电时,能量被释放而转变为功。如果放电时间极短,就可得到瞬时极大的功率和冲击电流。

电容器储积的能量可用下式表示:

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \text{ J} \quad (29.1-4)$$

式中 C ——电容器的电容 F
 U ——外施直流电压 V

2.3 电容器的无功功率(容量)和损耗功率

电容器在交流电压下充电时,其无功功率为

$$P_q = \omega CU^2 \text{ var} \quad (29.1-5)$$

式中 U ——外施交流电压 V
 C ——电容器的电容 F
 ω ——角频率, $\omega = 2\pi f$ (f 为频率 Hz)

也可用下式表示:

$$P_q = 2\pi f CU^2 \times 10^{-3} \text{ kvar} \quad (29.1-6)$$

电容器的损耗功率可用下式表示:

$$P_s = 2\pi f CU^2 \text{tg} \delta \text{ W} \quad (29.1-7)$$

式中 $\text{tg} \delta$ ——电容器的损耗角 Θ 正切

2.4 电容器的储能因数

在电容器中,介质的主要作用是储能。储能的计算公式如下:

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 V \epsilon E^2 \text{ J} \quad (29.1-8)$$

$$P_q = \omega \epsilon_0 V \epsilon E^2 \text{ var} \quad (29.1-9)$$

式中 V ——介质的有效体积, $V = Sd \text{ cm}^3$
 E ——介质的允许工作电场强度,对平板电容器 $E = \frac{U}{d} \text{ V/cm}$

ϵE^2 ——电容器介质的储能因数

由以上二式可见,如果在直流电压下电容器的储能 W 或在交流电压下电容器的容量 P_q 为给定

⊖ 理想电容器的电流在相位上超前电压 90° ,在实际的电容器中,由于有损耗,电流与电压之间的相位 ϕ 不是 90° ,而是 $\phi + \delta = 90^\circ$,余角 δ 称为损耗角。

值, 则介质的有效体积 V 与储能因数 ϵE^2 成反比, ϵE^2 愈大, V 就愈小, 就愈节省材料, 这时电容器单位体积的储能或单位体积的千乏数也愈大, 即电容器的比特性愈好。比特性是评价电容器技术经济性能的综合指标, 对于移相电容器常用公斤/千乏或千乏/升来表示, 对脉冲电容器则常用焦耳/升来表示。

为了提高储能因数和改善比特性, 应采用介电系数和允许工作场强高的介质。用介电系数较高的液体介质浸渍电容器纸, 可提高介电系数; 而用浸渍纸与塑料薄膜复合介质, 则可提高允许工作场强, 更能提高储能因数。

2.5 交流电容器的补偿作用

2.5.1 移相电容器

图 29.1-3 为移相电容器应用原理图。由于容性电流 I_c 相位超前电压 90° , 可抵消一部分相位滞后于电压 90° 的感性电流 I_x , 使电流由 I_1 减小为 I_2 , 相角由 φ_1 减小到 φ_2 , 从而使功率因数从 $\cos \varphi_1$ 提高到 $\cos \varphi_2$ 。

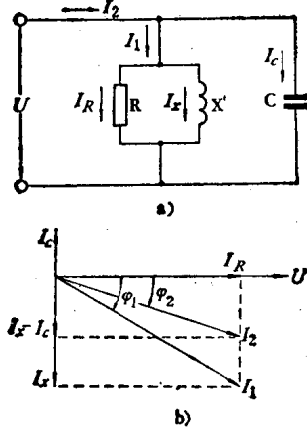


图 29.1-3 移相电容器应用原理图
a—线路图 b—矢量图

由图 29.1-3 可求得提高功率因数所需电容器容量为

$$P_q = P \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_2} - 1} \right) \text{ kvar} \quad (29.1-10)$$

并联电容器后节省的视在功率为

$$P_{sj} = P \left(\frac{1}{\cos \varphi_1} - \frac{1}{\cos \varphi_2} \right) \text{ kva} \quad (29.1-11)$$

式中 P ——负荷功率 kW

2.5.2 串联电容器

图 29.1-4 表示接有串联电容器的输电或配电线路及其矢量图。图中 U_s' 和 $\cos \varphi_s'$ 分别为送电端的电压和功率因数; U_y 和 $\cos \varphi_y$ 分别为用电端的电压和功率因数; I 为负载电流; R_l 和 X_l 为线路电阻和感抗; X_c 为串联电容器容抗。由图可见, 加了串联电容器后, 送电端的电压由 U_s' 变为 U_s , 其值和 U_y 相差不多, 相角由 φ_s' 变为 φ_s , 使功率因数和电压调整率 $\left(\frac{U_s - U_y}{U_y} \times 100\% \right)$ 都得到改善。

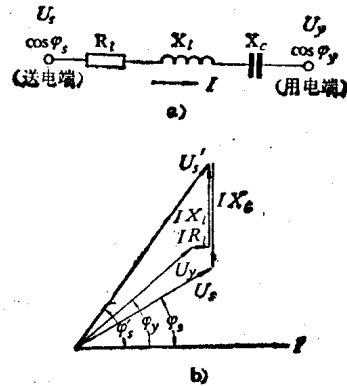


图 29.1-4 串联电容器的应用原理图
a—线路简图 b—矢量图

3 关键技术和发展方向

为了满足国民经济和科学技术不断发展的需要, 应进一步提高电力电容器产品的质量, 增加产量和品种以及发展超高压和成套产品。同时应重视有关的关键技术问题和加强对若干基础理论的试验研究工作。

3.1 提高介质性能, 发展采用新介质

为了使电容器在高温下有良好的热稳定性, 需进一步提高高温低损耗纸的质量, 尽量减少钠、钾离子及其它杂质的含量; 为了提高耐电强度, 改善产品比特性, 对于脉冲电容器及硅油移相、串联电容器等, 可发展采用密度为 1.3 克/厘米^3 的高温低损耗电容器纸。

迅速发展和采用优质薄膜介质, 可以使电容器容量大幅度增加, 并可提高产品质量。首先应采用聚丙烯薄膜与纸的复合介质, 然后可研究并采用全

薄膜介质,进一步改善产品比特性。为此应扩大聚丙烯薄膜的生产并不断提高质量(如厚度的均匀性及耐电强度等),同时应研究改善薄膜浸渍性能的措施。此外,可发展采用有自愈性能的金属化纸和金属化薄膜介质,分别用以制造液体介质浸渍的电容器和元件电压在250V以下的干式金属化薄膜电容器。

在浸渍剂方面,应大力研究采用无毒或微毒的液体介质。苯甲基硅油的介电系数略高于电容器油,电老化和耐热性都较好,在性能更好的浸渍剂使用以前,可考虑将其用于部分移相及串联电容器。

3.2 改进制造工艺,提高自动化水平

为了适应膜纸复合介质电容器的发展,在元件卷制的工艺过程中,应保持很高的清洁度,须改进有关设备和工艺;为了提高浸渍效果,产品真空浸渍处理过程的真空度应提高到 10^{-3} mmHg左右,并可研究采用单台真空干燥、注油、然后破空加压浸渍的方法。在产品的真空浸渍系统中,应采用真空度和温度自动记录装置,浸渍剂的净化处理系统则应向遥测、遥控及全自动控制发展。

此外,在卷制、装配和试验等工序中应采用滚轴运输带,以减轻劳动强度。

3.3 改进产品结构,发展超高压及成套产品

随着生产技术的发展,在产品结构方面可进行相应的改进,如移相电容器元件可采用铝引线片和较薄的极板,以简化工艺和节省材料;大容量的产品可采用多芯子结构;为了减少渗漏,外壳可采用拉伸结构。

由于电力系统和现代科学技术不断发展的需要,电力电容器的生产应提供更多的成套及超高压产品。例如成套自动调节功率因数的移相电容器装置及静止补偿装置、串联补偿装置,冲击电压和冲击大电流发生装置及高压直流装置等。超高压产品方面要发展1200千伏及以上的电容式电压互感器及1200~1500千伏标准电容器等。

为了适应以上关键技术及发展,必须相应地加强有关基础理论的试验研究工作。例如全面研究膜纸复合介质的性能;研究大电容元件和整台产品局部放电测试技术;进行电容器冷态工作性能试验、过电压试验;研究过电流及涌流对电容器性能的影响;改进电容式电压互感器铁磁谐振保护装置及研究超高压标准电容器的电场分布等。

第2章 电力电容器的介质

电容器介质的主要作用是储能,它是决定电容器性能的关键材料。对电容器介质的要求是储能因数大,体积电阻系数大,损耗角正切小,耐老化性能好,工艺处理较容易、来源广泛、价格便宜等。

关于介质的极化、电导、损耗和击穿等基本概念参见《电机工程手册》第9篇《绝缘材料》;本章着重介绍电力电容器介质的性能及其在应用中的一些问题。

1 电容器介质的电气性能

1.1 介质的极化和介电系数

电力电容器介质极化和介电系数的特点见表29.2-1。

1.2 体积电阻系数和自持放电时间常数

1.2.1 体积电阻系数

当对电容器施加直流电压进行充电时,其电流随时间的变化如图29.2-1所示。其中电子位移电流由介质的电子位移式极化产生,随时间增加很快降落至零;吸收电流由介质的偶极式极化等形成,随时间增加逐渐降落至零;漏导电流 I_1 ,由介质中的自由离子及外来杂质在电场作用下运动而产生;总的充电电流,由上述三种电流叠加形成,随时间增加而下降,最后达到稳定值 I_1 。介质的绝缘电阻 \ominus 等

\ominus 介质的绝缘电阻是由体积电阻和表面电阻并联而得到。电力电容器的极板面积很大,致使漏导电流主要由体积电阻来决定。因此可认为电容器的绝缘电阻近似等于介质的体积电阻。

表 29-2-1 电力电容器介质极化和介电系数的特点

介质类别	介质举例	主要极化形式和极化速度	ϵ		
			数值范围	与频率的关系	与温度的关系
中性及弱极性介质	氮、二氧化碳及六氟化硫气体	电子位移式极化。极化速度很快，极化形成的时间约 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 秒	1	在 10^6 赫以下时，与频率的关系很小	随温度升高略微减小
	电容器油，苯甲基硅油，聚丙烯薄膜		2~2.9		
极性介质	蓖麻油，三氯联苯，聚酯薄膜，聚碳酸酯薄膜	除电子位移式极化外，还有极化强度较大的偶极式极化。极化形成时间约 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ 秒	3~6	随频率增高而减小	温度较低或负温下，随温度升高而增大；温度较高时，随温度升高而减小
组合介质	浸渍纸，浸渍纸与薄膜复合介质	除具有各单一介质的极化形式外，还具有夹层式极化。极化形成时间约在 10^{-2} 秒以上	决定于各单一介质的 ϵ 值	100 赫以上时，夹层极化对 ϵ 无影响；工频下，夹层极化会使 ϵ 增大	决定于各单一介质

于电容器的端电压(U_0)与其漏导电流(I_l)之比。介质的体积电阻系数是指介质在面积为 1cm^2 和厚度为 1cm 时所具有的体积电阻值，通常以 ρ_v 表示，单位为 $\Omega \cdot \text{cm}$ ，它是表征介质绝缘性能的主要参数。

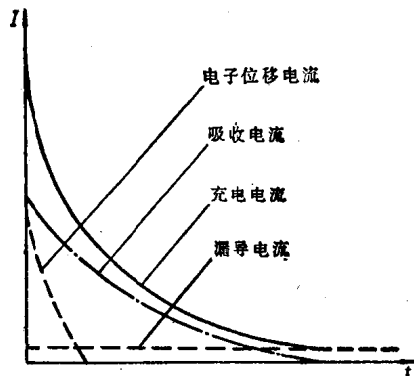


图 29-2-1 电容器充电时电流随时间的变化

介质的绝缘电阻(R_j)是电力电容器实际生产中常采用的电气参数之一，它与电容器的结构尺寸及介质的体积电阻系数有关

$$R_j = \rho_v \frac{d}{S} \quad \Omega \quad (29.2-1)$$

式中 d ——极间介质厚度 cm

S ——极板面积 cm^2

ρ_v ——体积电阻系数 $\Omega \cdot \text{cm}$

当电容器的结构尺寸一定时，其绝缘电阻主要决定于介质的体积电阻系数。

1.2.2 自持放电时间常数

电容器用直流电源充电后切断电源，其端电压 U_0 将逐渐自行降低

$$U_c = U_0 e^{-\frac{t}{R_j C}} \quad (29.2-2)$$

式中 U_0 ——切断电源时电容器的端电压 V

t ——切断电源后经过的时间 s

$R_j C$ ——电容器的自持放电时间常数 $\Omega \cdot \text{F}$ 或 s

由式 (29.2-1) 和式 (29.1-2) 可知自持放电时间常数

$$\begin{aligned} R_j C &= \rho_v \frac{d}{S} \times 8.86 \times 10^{-14} \frac{\epsilon S}{d} \\ &= 8.86 \times 10^{-14} \rho_v \epsilon \quad \Omega \cdot \text{F} \text{ 或 } \text{s} \quad (29.2-3) \end{aligned}$$

自持放电时间常数与电容器的尺寸无关，而仅决定于介质的性能。 $R_j C$ 常作为某些电容器（例如脉冲电容器等）的质量指标之一，对于要求时间常数大的产品，应选用 ρ_v 和 ϵ 大的介质。

1.2.3 影响因素

介质的体积电阻系数受外界因素的影响很大，如有杂质离子混入介质中以及介质受潮后，都将使 ρ_v 大大降低（见表 29-2-2）。因此，电力电容器在制造过程中，特别是在卷制、装配和真空干燥浸渍时，必须保持十分清洁，严防杂质混入介质或使介质受潮。

温度对体积电阻系数的影响也很大，当温度升

表 29-2-2 杂质对体积电阻系数的影响

介质举例	介质状况	ρ_v $\Omega \cdot \text{cm}$
电容器油浸纸	清洁干燥	10^{14}
	吸潮	$10^9 \sim 10^{11}$
蓖麻油	无水分和杂质	10^{12}
	含水分和杂质	10^9

高时,形成介质漏导的离子数及离子移动速度增大, ρ_v 随温度升高呈指数形式下降。例如:电容器油浸渍纸与聚酯薄膜复合介质电容器的时间常数在20°C时为4000秒,在80°C时则仅100秒左右;大致上温度每升高10°C绝缘电阻约降低一半。

1.3 介质的损耗

介质在电场作用下可能产生三种形式的损耗:

(1)极化损耗——介质在极化过程中由于克服内部分子间的阻碍而消耗的能量(对于极性介质,主要是偶极式极化损耗,即偶极损耗)。(2)漏导损耗——介质的漏导电流产生的损耗。(3)局部放电 \ominus 损耗——介质内部或极板边缘局部放电产生的损耗。

介质的损耗通常用损耗角正切 $\text{tg} \delta$ 来表示。大多数电力电容器都要求介质的 $\text{tg} \delta$ 很小,如 $\text{tg} \delta$ 增大,会引起产品发热,易导致热击穿,严重影响产品

寿命。因此, $\text{tg} \delta$ 是这些(主要是交流)电容器重要的质量指标之一。电力电容器所用介质的 $\text{tg} \delta$ 一般在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 左右。

介质的 $\text{tg} \delta$ 主要决定于介质的性质,温度、频率、电场强度及杂质对其影响也很大(见表29-2-3)。因此,为了确保产品 $\text{tg} \delta$ 值在标准允许范围以内,应选用在工作频率和所要求的温度下 $\text{tg} \delta$ 低的介质。此外,还须严格控制工艺过程,力求除去介质中的水分,并应防止杂质混入介质及产品吸潮等。

1.4 介质的耐电强度

介质的耐电强度一般都以击穿场强来表示。介质击穿产生的原因及其影响因素等,见表29-2-4。有关击穿的机理,详见《电机工程手册》第3篇《高压技术》及第9篇《绝缘材料》。

通常电击穿场强比热击穿场强度高,而老化击穿场强比前二者都低。电力电容器中所用组合介质的耐电强度及其影响因素,主要取决于各单一介质的情况。其中脉冲电容器的击穿多属于电击穿;移相、串联、电热电容器等产品由于热不稳定而击穿属于热击穿。介质的耐电强度直接影响产品寿命,应根据产品技术要求选择合适的介质。此外仍需有良好的工艺,除去杂质及水分等,从而保证产品在较高工作场强下运行的可靠性。

表 29-2-3 温度、频率等对介质 $\text{tg} \delta$ 的影响

损耗形式	介质举例	温度	频率	电场强度	杂质	
					离子性	极性
偶极损耗	蓖麻油,三氯联苯;聚酯薄膜	频率不变时, $\text{tg} \delta$ 在某一温度(多在负温)下出现峰值;频率升高时, $\text{tg} \delta$ 将在较高的温度下出现峰值	温度不变时, $\text{tg} \delta$ 在某一频率下出现峰值;温度升高时, $\text{tg} \delta$ 将在较高的频率下出现峰值	—	—	使 $\text{tg} \delta$ 增大,特别是水分会使 $\text{tg} \delta$ 显著增大
电导损耗	净化不够的电容器油;含 Na^+ 或 K^+ 离子较多的电容器纸	温度升高时, $\text{tg} \delta$ 呈指数形式上升	频率增高时, $\text{tg} \delta$ 呈倒数关系下降	—	温度升高时,使 $\text{tg} \delta$ 增大;高温下, $\text{tg} \delta$ 显著增大	—
局部放电损耗	气体介质;含气隙较多的组合介质	—	—	高于起始局部放电场强 ① 后,随电场强度的提高, $\text{tg} \delta$ 显著上升	—	—

① 介质中开始出现局部放电时的电压,称为起始局部放电电压,其相应的平均场强称为起始局部放电场强。

② 在电场作用下,介质中产生非贯穿性放电,称为局部放电。

表 29.2-4 介质的各种击穿形式及其影响因素

击穿形式	介质	产生击穿的条件和原因	影响因素
电 击 穿	气体介质	在高电场作用下,由于电子撞击分子使其电离,形成电离区,这种电离区不断发展,沟通电极而产生击穿	1. 电极间距离 2. 气压状态 (详见第2节)
	液体介质	1. 由于电子撞击介质分子,使之游离,带电质点增多,造成介质中局部电场增高导致击穿 2. 介质中含有的水分或固体杂质,在电场作用下沿电场方向排列,形成导电“小桥”导致击穿	1. 电极间距离 2. 水分或固体杂质 (详见第3节)
热 击 穿	固体介质	损耗小、结构均匀的介质,温度不高时,在高电场作用下内部带电质点剧烈运动,发生撞击游离,破坏分子结构,使电导增大,导致击穿	1. 介质分子结构及组成 2. 介质厚度 3. 极板面积 4. 电压波形 5. 温度 6. 杂质及气隙等 (详见第4及第5节)
	组合	结构不均匀、损耗大的介质,在温度高而散热又不良的条件下,介质产生的热量大于电容器所能散走的热量时,使介质内部温度不断升高,造成击穿	
老 化 击 穿	介质	介质在电、热、化学、机械力等(或其中一部分)因素同时作用下,经过一段较长的时间后发生击穿	

1.5 局部放电和介质的老化

电容器中的局部放电大都首先发生于介质中残存的微小气泡或油隙中。图 29.2-2 为含气泡的介质示意图,其起始局部放电场强为

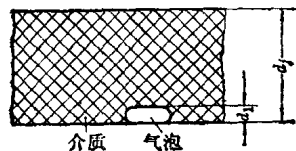


图 29.2-2 含气泡的介质示意图

$$E_{jg} = \frac{U_{qg}}{ed_1} \left[1 + \frac{d_1(\epsilon - 1)}{d_j} \right] \text{ kV/mm} \quad (29.2-4)$$

式中 ϵ ——极间介质的介电系数

d_1 ——气泡厚度 μm

d_j ——极间介质厚度 μm

U_{qg} ——气泡的击穿电压,当 d_1 为 $6 \sim 8 \mu\text{m}$ 或更小时,可取最低值,约为 250 V (有效值)

若经真空处理后消除气泡,用击穿场强高、介电系数大的液体介质充满上述空隙时,则其起始局部放电场强为

$$E'_{jg} = \frac{U_{yq}}{ed_1} \left[\epsilon_y + \frac{d_1(\epsilon - \epsilon_y)}{d_j} \right] \text{ kV/mm} \quad (29.2-5)$$

式中 ϵ_y ——液体介质的介电系数

U_{yq} ——液体介质在其极间距离为 d_1 时的击穿电压 V

d_1 ——油隙厚度 μm

电容器的极板边缘由于电场集中,场强比极板间的均匀场强要高,也可能产生局部放电。当极板对齐、边缘充满液体介质时,其局部放电场强为

$$E'_{jg} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\epsilon_y}{\epsilon}} \sqrt{\frac{d_{yb}}{d_j}} E_{byj} \text{ kV/mm} \quad (29.2-6)$$

式中 d_{yb} ——极板厚度 μm

E_{byj} ——极板边缘处薄油层的击穿场强 kV/mm

局部放电对介质的危害极大。局部放电时,离子或电子直接撞击介质,使液体介质分子分解;介质中的气泡放电产生臭氧、氮的氧化物等,使介质遭到化学腐蚀;局部放电使介质损耗增大和局部过热,同时产生对介质有损伤作用的光。总之,局部放电易使介质电老化,性能变坏(如击穿场强降低等),以至逐渐破坏。因此,电力电容器(特别是用于交流电压下的电容器)宜选用高电场作用下不析气的浸渍剂;设计产品时应选取合理的极间介质厚度和工作场强;同时还要严格控制浸渍剂处理及产品真空浸渍工艺,提高真空度,尽量消除气泡,以提高产品的局部放电场强,从而保证交流电容器在局部放电试验时不发生局部放电,或即使发生局部放电但不发展。

⊙ 几种液体介质薄油层时的击穿场强值参见表 29.2-6 注①。