

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_s ——元件中纸层数
C ——电容	P_d ——导体损耗功率
C_b ——标称电容	P_f ——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_x ——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_f ——击穿电压
E_{jf} ——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

第1章 概述

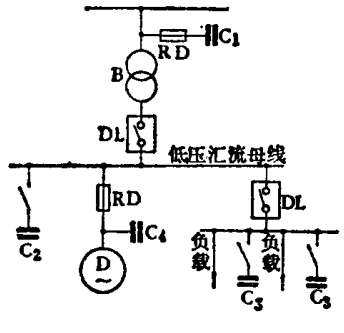
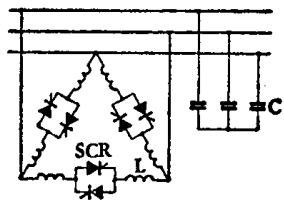
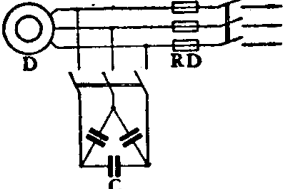
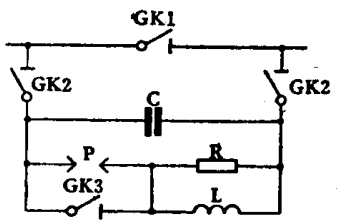
电力电容器在电力系统、工业生产设备、高压试验及现代科学技术中的应用十分广泛。根据不同的使用要求,现已发展形成了许多类型和品种。

1 电力电容器的分类和用途


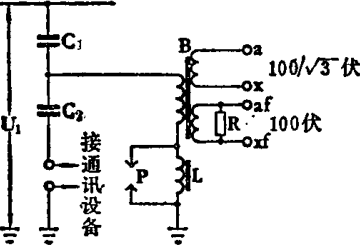
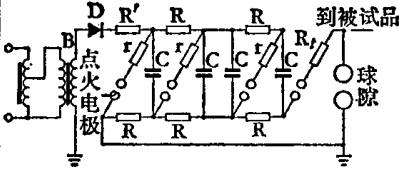
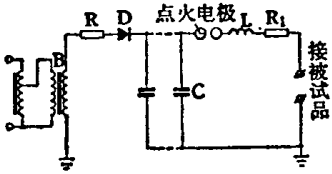
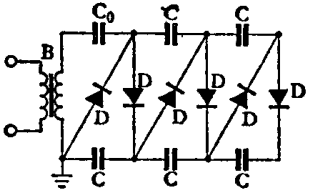
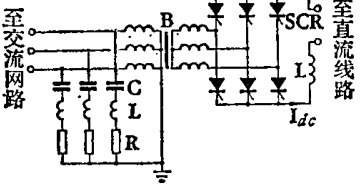
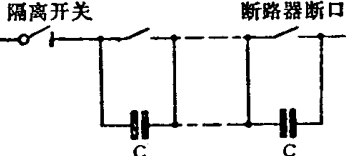
电力电容器按用途不同可分为九大类,其用途、

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。

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	<p>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</p> <p>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</p>	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		<p>移相电容器的几种使用方式和安装地点:</p> <p>① 并联接于 6.3、10.5 及 35 千伏等高压配电网</p> <p>② 集中并联接于 400 伏低压汇流母线上</p> <p>③ 分组并联接于各低压配电线上</p> <p>④ 与单台感应电动机并联,作分散补偿</p> <p>图中 C—移相电容器 RD—熔断器 B—变压器 DL—断路器</p>
电容器				<p>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</p> <p>图中 C—电容器 L—电抗器 SCR—可控硅元件</p>
电容器				<p>图中 D—感应电动机 C—电容器 RD—熔断器</p>
串联电容器	串联接于工频高压输、配电线路中,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、加长输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		<p>图为广泛使用于输、配电线路的串联补偿装置的一相简化接线图</p> <p>图中 GK₁、GK₂、GK₃—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</p>

(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,用于载波通讯以及测量、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 		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,能得到高达几千千伏的冲击电压 图中: R _t —调波电阻 D—二极管
				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R ₁ 对被试品放电,能产生高达几百千安的冲击电流
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 	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 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		图为电容器用于串级直流设备上
				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
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		<p>图为防护电容器C作发电机F的保护装置</p> <p>图中·FB—阀式避雷器</p>
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		<p>图为西林电桥原理图,其中C₀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</p>

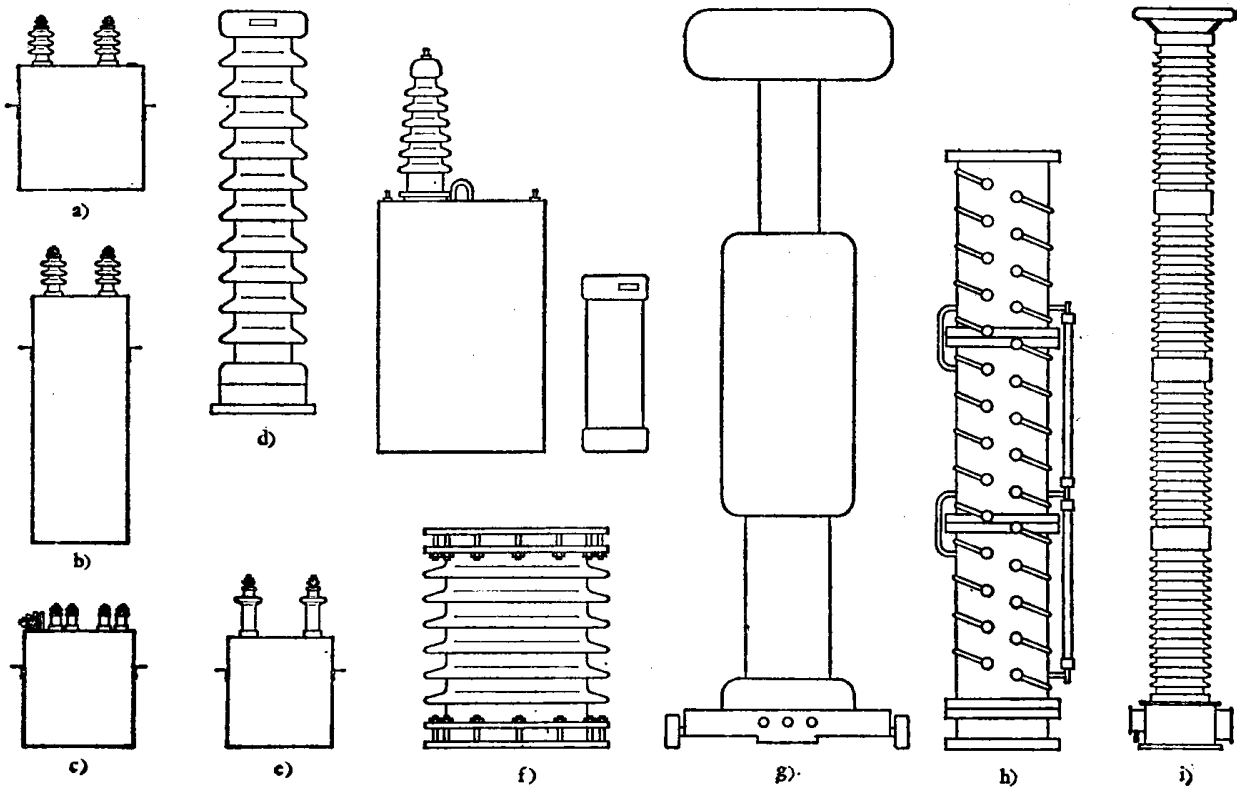


图 29-1-1 几种主要电力电容器及成套装置外形图

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)的导电极板组成,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

$$8.86 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$$

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

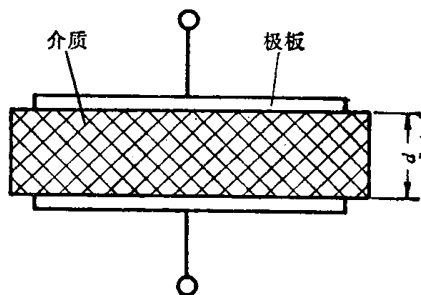


图 29.1-2 平板电容器原理图

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:

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

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工作时,其无功功率为

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

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:

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

电容器的损耗功率可用下式表示:

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

式中 $\text{tg} \delta$ ——电容器的损耗角 \ominus 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

$$\text{容器 } E = \frac{U}{d} \text{ V/cm}$$

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

\ominus 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 $\varphi + \delta = 90^\circ$,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 $\cos \varphi_2$ 。

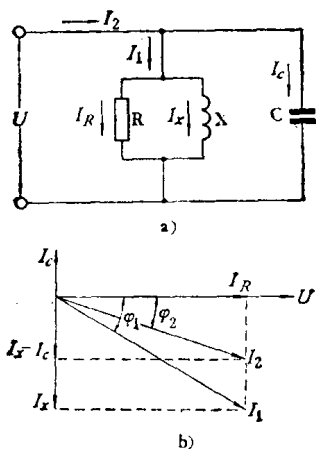


图 29.1-3 移相电容器应用原理图
a—线路图 b—矢量图

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

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

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。

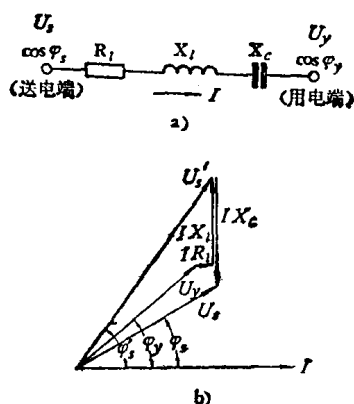


图 29.1-4 串联电容器的应用原理图
a—线路简图 b—矢量图

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7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_l ,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_l 。介质的绝缘电阻 \ominus

\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 值及其比例	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	决定于各单一介质及其比例

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。

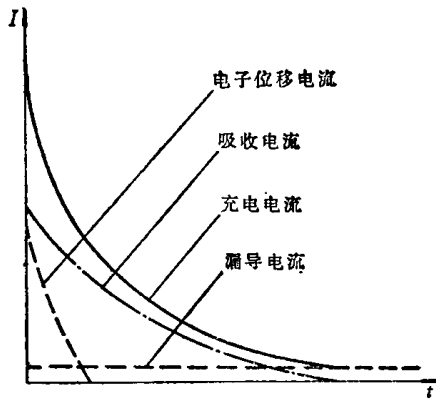


图 29-2-1 电容器充电时电流随时间的变化

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

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

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	$\rho_v, \Omega \cdot \text{cm}$
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,会引起产品过热,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《高电压技术》及第7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 3. 电极形状
	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) 3. 电极形状
	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
热 击 穿	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	4. 电压波形 5. 温度 6. 杂质及气隙等 (详见第4及第5节)
		老化击穿	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

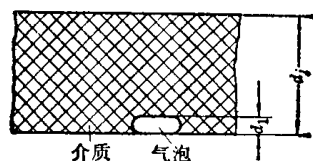


图 29.2-2 含气泡的介质示意图

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

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_{qf} ——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

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

式中 ϵ_v ——液体介质的介电系数
 U_{vj} ——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

$$E''_{jf} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\epsilon_v}{\epsilon}} \sqrt{\frac{d_{jb}}{d_j}} E_{bvj} \text{ kV/mm} \quad (29.2-6)$$

式中 d_{jb} ——极板厚度 μm
 E_{bvj} ——极板边缘处薄油层的击穿场强 \ominus
 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。

\ominus 几种液体介质薄油层时的击穿场强值参见表 29.2-6 注①。

表 29-2-5 电力电容器常用气体介质的性能

气体介质	分子式	密度 g/dm ³ (25°C)	凝聚点 °C	沸点③ °C	ε		与空气击穿 场强之比
					压力为 1 kgf/cm ²	压力为 20 kgf/cm ²	
六氟化硫	SF ₆	6.10	-51①	-63.8(升华)	1.0091		2.3~2.5
氮气	N ₂	1.25	-210	-195	1.00059	1.0109	1.0
二氧化碳	CO ₂	1.8	-56.6②	-78.5	1.00098	1.020	0.9
空气	—	1.18	-213	-192	1.00058	1.0109	1.0

① 2.2大气压下的数值。② 5大气压下的数值。③ 标准大气压下的数值。

2 气体介质

气体介质的主要特点是 $\text{tg} \delta$ 很小, ϵ 很稳定。它主要用来制造充气式高压标准电容器。几种常用气体介质的性能见表 29-2-5。

在均匀电场中, 气体的击穿场强与极间距离和气体压力有关。图 29-2-3 为空气在均匀电场中的击穿场强与电极间距离的关系。气体的击穿场强随压力增大而近似线性地增高, 当压力大到某一值后, 击穿场强的增高很小。例如在同心圆柱形电极间的近似均匀电场中, 氮和二氧化碳气体压力超过 15~20 大气压、六氟化硫气体超过 6~8 大气压时, 击穿场强几乎不再增高。因此, 当采用氮制造标准电容器时, 常用 13~15 大气压, 其最高工作场强值约为 10~12 kV/mm; 采用六氟化硫时, 常用 4~6 大气压, 其最高工作场强值亦为 10~12 kV/mm。

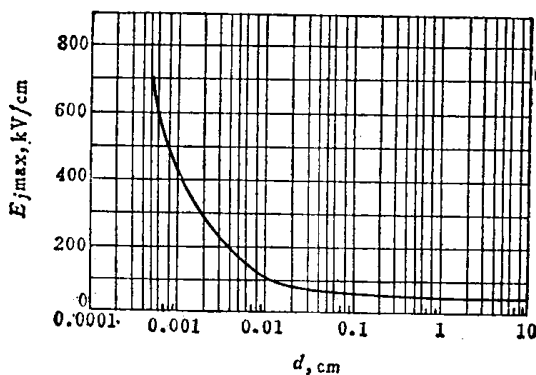


图 29-2-3 空气在均匀电场中击穿场强与电极间距离的关系

使用六氟化硫气体时应该注意: (1)六氟化硫在常温下很稳定, 但在电晕和电弧放电下温度超过 200°C 时, 尤其当有水分存在时, 可能分解出有害物质, 这些物质与含硅材料及镀锌金属、黄铜等反应,

生成有腐蚀性的 HF、H₂SiF₆ 等, 因此使用时要特别注意防止水分渗入, 且不宜与含硅材料合用。(2)纯度很高的六氟化硫一般无毒, 但若其中混有 SF₄ 和 S₂F₁₀ 时, 毒性很大, 因此在使用中对六氟化硫的纯度要求很高。对进厂的每批六氟化硫都必须做严格的化学纯度分析, 同时在使用中也要充分注意安全。

3 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, 从而提高介质的介电系数和耐电强度, 改善局部放电特性和散热条件等。

选择电容器的液体介质时, 除应满足对电容器介质一般性能要求外, 还应考虑以下特殊要求: (1)高电场作用下吸气性好; (2)要求粘度小、凝固点低、挥发性小、闪点高; (3)化学性能稳定, 并能与电容器内其他材料稳定共存, 特别是与薄膜的相容性要好; (4)无毒或微毒。

实际上, 要同时满足电容器对介质的各种性能要求往往是很困难的; 不同用途的电容器对介质性能的要求也往往不同。因此, 必须根据不同的要求选用合适的液体介质。

电力电容器常用液体介质的性能见表 29-2-6 和图 29-2-4~29-2-7。

3.1 电容器油

它是矿物油。其基本性能见表 29-2-6。此外具有电容温度系数小, 容易处理, 一般无毒, 来源广, 价格便宜等优点; 缺点是介电系数不够高, 用于电力电容器当工作温度超过 80°C 时容易热老化[⊖], 在长期

⊖ 在高温下油被氧化, 酸值增大, 使 $\text{tg} \delta$ 增大, 介质性能变坏, 形成热老化。

表 29-2-6 电力电容器用液体介质的性能

介质名称	外观	密度 (15°C) g/cm ³	粘度 (60°C) °E	导热系数 W/cm·°C	体积膨胀系数 1/°C	凝固点 °C	闪点 °C (不低于)	酸值 KOHmg/g (小于)	吸气性	ϵ	tg δ (50Hz 不大于)	ρ_v $\Omega \cdot \text{cm}$ (20°C不小于)	E_j ① kV/2.5mm (不小于)
电容器油	淡黄	0.86~0.89	1.9	(1.1~2) $\times 10^{-3}$	6.5×10^{-4}	-45	135	0.02	差	2.15 (60°C)	0.004 (100°C)	1×10^{14}	60
苯甲基硅油	无色透明~淡黄	1.01~1.08	2.33	1.4×10^{-3}	7.5×10^{-4}	-65	280	0.013	优	2.63~2.8 (20°C)	0.00032 (25°C)	1×10^{14}	45
蓖麻油	无色透明	0.96	10			-17	250	1.5	优	4.2 (20°C)	0.02 (60°C)	1×10^{12}	45
十二烷基苯	无色透明	0.87	1.21		7.8×10^{-4}	-60	135	0.01	优	2.25~2.3 (60°C)	0.0005 (60°C)	5×10^{14}	60
邻苯酯	无色透明	0.95	5.15			-23	222	0.02	良	3.86 (60°C)	0.0017 (91°C)	1×10^{14}	50
偏苯酯	无色透明~淡黄	0.98	5.48			-40	254	0.02	良	4.22 (60°C)	0.0029 (89°C)	1×10^{14}	50
三氟联苯②	无色透明	1.38	1.5	1.1×10^{-3}	6.7×10^{-4}	-18	180	0.02	优	5.2 (60°C)	0.03 (90°C)	1×10^{12}	45

① 表内数据系用液体介质击穿试验的标准电极、间隙为 2.5mm 时测得。随着间隙减小, E_j 增高, 介质为薄油层时 E_j 很高, 如电容器油和苯甲基硅油和薄油层的击穿场强为

介质名称	E_j , kV/mm	
	$d=1\text{mm}$	$d=0.2\text{mm}$
电容器油	24	350
苯甲基硅油	22	280

② 由于有毒, 已停止使用, 列入表内是为了对比。

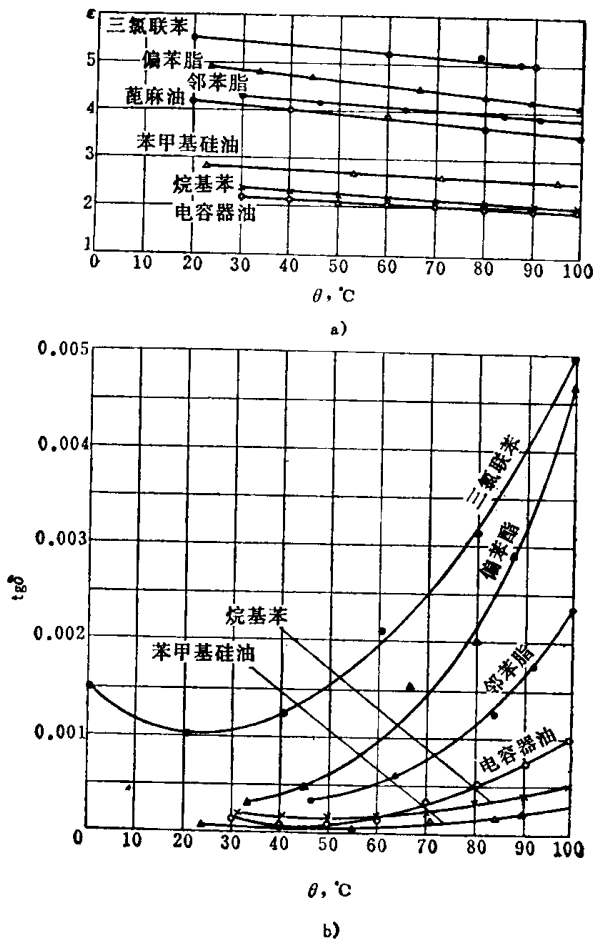


图 29-2-4 几种液体介质的 ϵ 及 $\text{tg}\delta$ 与温度的关系

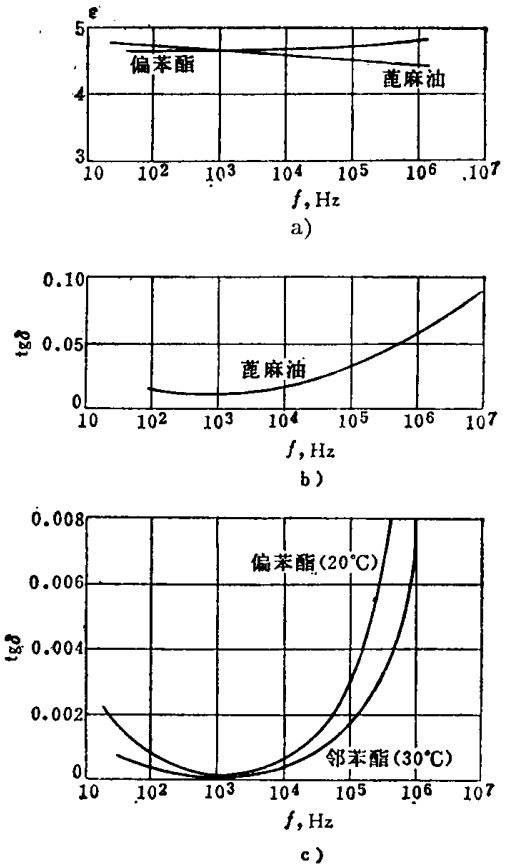


图 29-2-5 几种液体介质的 ϵ 及 $\text{tg}\delta$ 与频率的关系

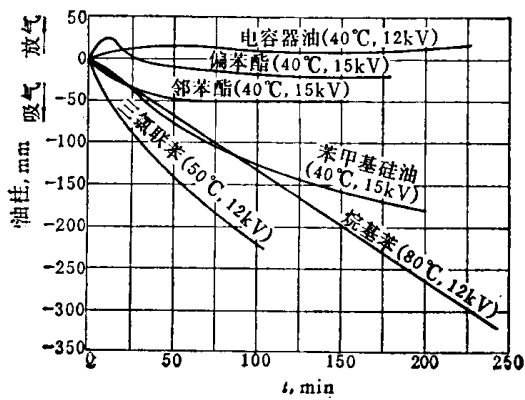


图 29-2-6 几种液体介质在高电场作用下的吸、放气性能 (试验采用“电缆 63 型化气仪”)

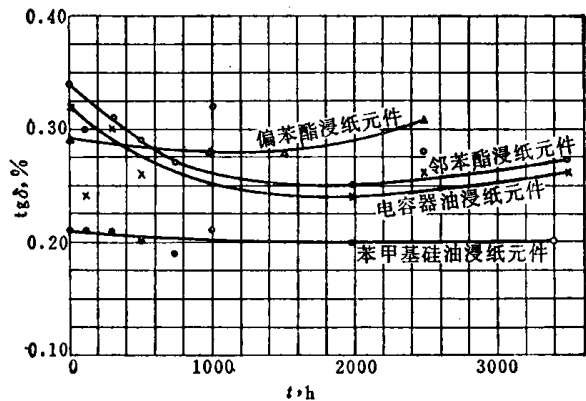


图 29-2-7 几种液体介质浸渍纸的 $\text{tg}\delta$ 随老化时间的变化 元件 ($6 \times 10 \mu\text{m}$) 老化条件: $\theta = 80^{\circ}\text{C}$, $U = 1 \text{ kV}$

高电场及过电压作用下较易电老化 \ominus ，分解并析出气体，使产品膨胀，如保护不良，击穿时可能引起爆炸和燃烧。

纯净电容器油的基本成份可分为烷烃、环烷烃和芳香烃。各种成份的含量对其性能影响很大。含烷烃和环烷烃多的电容器油，化学稳定性及热老化性能较好，但电老化性能差；而含芳香烃较多的电容器油电老化性能较好 \ominus ，所以在炼油过程中应保持一定的芳香烃含量。

电容器油在热老化时被氧化，酸值增高， $\text{tg } \delta$ 增大；另一方面，由于金属（特别是铜）与油接触时生成盐类，也使 $\text{tg } \delta$ 增大，但酸值不会很快上升。实际中常通过测油的 $\text{tg } \delta$ 和酸值来检查与判断油的老化程度。此外，铜对电容器油的老化起催化作用，所以生产中用的铜引线片及连接片等必须镀锡，也可采用铝引线片代替铜引线片。

3.2 苯甲基硅油

苯甲基硅油的性能见表 29.2-6。它基本无毒，耐热性好，不易燃烧，化学稳定性好， $\text{tg } \delta$ 小， ϵ 较电容器油略高，且具有优良的吸气性能，用于移相电容器可提高单台容量，改进产品比特性。此外，用它浸渍纸的起始局部放电场强与电容器油浸渍纸相差不多，但其局部放电熄灭场强 \ominus 却高得多，而且耐过电压性能很好，因此还特别适于制造串联电容器。苯甲基硅油的电容温度系数很小（见图 29.2-4），高频和低温下性能都较好， ϵ 及 $\text{tg } \delta$ 在很宽的温度（ $-40 \sim +110^\circ\text{C}$ ）及频率（ $10^3 \sim 10^8 \text{ Hz}$ ）范围内变化很小（可参看图 29.2-4），因此也适于制造中频电热电容器和耦合电容器。

苯甲基硅油的缺点是耐电强度比电容器油低，耐电弧性能稍差，目前产量不大，价格较贵。

3.3 蓖麻油

其基本性能见表 29.2-6，除此之外，它的耐电弧能力强，击穿时无碳粒，在高温高电场下会在极板表面生成一层聚合物保护膜，使电容器寿命较长；它的缺点是，粘度较大，油处理及降低 $\text{tg } \delta$ 比较困难，工频下 $\text{tg } \delta$ 较高，并且它是植物油，来源受限制。它适于制造直流和要求容量大、体积小、寿命长的脉冲电容器。

3.4 十二烷基苯

它是芳香烃的一种。具有较低的粘度、比重、凝固点和损耗；吸气性良好；可以在较高的场强下长期工作；和聚丙烯薄膜相容性良好。可考虑研制用十二烷基苯浸渍纸与聚丙烯薄膜复合介质的高压移相电容器。

3.5 酯类油

邻苯酯和偏苯酯都属酯类油，它们的性能见表 29.2-6 及图 29.2-4~29.2-7。其介电系数和击穿场强都较高，略有吸气性。酯类油最大的缺点是易水解和氧化，特别是水解问题比较突出；在生产过程中，油处理和真空浸渍工艺都比较难以控制和适应，因此对它们的性能尚需作进一步的研究。

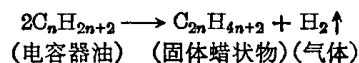
4 固体介质

固体介质是电力电容器的主要介质材料，除应满足电力电容器对介质的一般性能要求外，对它还有如下特殊要求：能做得很薄，厚度均匀，机械强度高，便于绕卷，导电微粒和弱点很少，浸渍性能及与浸渍剂的相容性好。目前常用的固体介质主要有电容器纸和塑料薄膜。

4.1 电容器纸

它是采用硫酸盐木浆制成。按使用要求不同，电容器纸分为 A 和 B 两大类，按密度（也称紧度）不同分为 0、I 和 II 等型号。A 类电容器纸主要用于电子工业用的电容器；B 类电容器纸则是用于电力电容器，它又分为普通的（B 型）和高温低损耗的（BD 型）两种，其性能见表 29.2-7。

- \ominus 电容器油在高电场作用下发生局部放电时，由于离子撞击作用使油分解而析出气体（主要是氢），同时生成固体蜡状物（X 蜡）：



析出的气体更加剧了局部放电，逐渐使介质老化，以至破坏。

- \ominus 芳香烃是环状结构的不饱和烃，它可以与电容器油中析出的氢结合，防止析出气体，因此使油的老化性能好。
- \ominus 局部放电开始后，若将外施电压下降到放电消失，这时的电压称为局部放电熄灭电压，相应的平均场强即局部放电熄灭场强。

表 29-2-7 电力电容器(B类)纸的性能

项 目	型 号																			
	BD-0				BD-I				BD-II				B-I				B-II			
	指 标																			
厚 度 μm 允许误差 $\pm\mu\text{m}$	15 0.8	10 0.7	12 1.0	15 1.0	8 0.4 0.5	10 0.6	12 0.7	15 1.0	10 0.7	12 1.0	15 1.0	8 0.4 0.5	10 0.6	12 0.7	15 1.0					
密 度 g/cm^3 允许误差 $\pm\text{g}/\text{cm}^3$	0.8 0.05 0.04	1.0 0.05				1.2 0.05				1.0 0.05				1.2 0.05						
$\text{tg } \delta$ (不大于)	80°C 0.001		60°C —		0.0014				0.0018				— 0.0017							
工频交流击穿电压① V (不小于)	380	300	325	350	310	350	380	430	300	325	350	310	350	380	430					
导 电 点 个/米 ² (不大于)	50	300	150	80	800	400	200	100	300	150	80	800	400	200	100					
纵向断裂长度 m (不小于)	7000	7000				8000	7500	7000	7000				8000	7500	7000					
透 气 度 ml/min (不大于)	5	7	5	3				2	7	5	3				2					
灰 份 % (不大于)	0.35																			
水 份 % (不大于)	4~10																			
水 抽 出 物 (不大于)	酸 度 %	0.007																		
	碱 度 %	0.007																		
	氯化物 %	0.004																		
	电 导 率 $\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}(25^\circ\text{C})$	2×10^{-6}								4×10^{-6}										

① 表内数值为每层纸的击穿电压。

对B类电容器纸的电气性能主要要求其击穿场强 E_b 、高和介电系数 ϵ 大以及介质损耗 $\text{tg } \delta$ 小。而影响这些性能的主要因素是纸浆成份和造纸工艺。纸浆中 α 纤维素含量越多, 导电杂质越少, 纸的电气性能就越好。因此造纸过程中应尽量避免和减少机械杂质和污秽物质混入纸浆中, 同时要避免纤维束状堆积、斑点、皱纹、针孔以及厚度不均匀等。

纸的 $\text{tg } \delta$ 在低温时主要决定于极化损耗。纸中 α 纤维素含量越多、半纤维素和木质素的含量越少时, $\text{tg } \delta$ 就越小(通常电容器纸浆中 α 纤维素的含量应控制在 90% 以上); 高温时, $\text{tg } \delta$ 主要是由纸浆中夹杂的钠、钾等低价阳离子 (Na^+ 、 K^+) 及 Cl^- 和

SO_4^{2-} 等低价阴离子产生的电导损耗。经验指出, 高温下 $\text{tg } \delta$ 与纸中低价金属离子含量之间有近似线性的关系, 当金属离子含量降低到某一程度时, $\text{tg } \delta$ 可以很小。例如 BD-0 纸浆, 用脱盐水多次冲洗后, 使含钠量在百万分之八、含钾量在百万分之二以下时, 其干纸在 100°C 时的 $\text{tg } \delta$ 可低于 0.0011。因此, 在造纸过程中使用的水需经阳离子、阴离子及混合离子多次交换, 以求除去水中的杂质离子, 降低纸在高温下的 $\text{tg } \delta$ 。

电力电容器由于损耗产生的热量与介质的 $\text{tg } \delta$ 成正比, 这些热量必须散发掉, 否则将造成产品热不稳定, 导致热击穿。若在高温下电容器纸的 $\text{tg } \delta$ 很

小,并采用工作温度较高的浸渍剂时,则电容器即可在较高的温度下热稳定,其允许工作温度、容量和寿命均可相应提高,比特性也能得到改善。因此,常须采用高温低损耗纸制造电力电容器。图 29.2-8 为 BD 纸的 $\text{tg } \delta = f(\theta)$ 标准曲线。

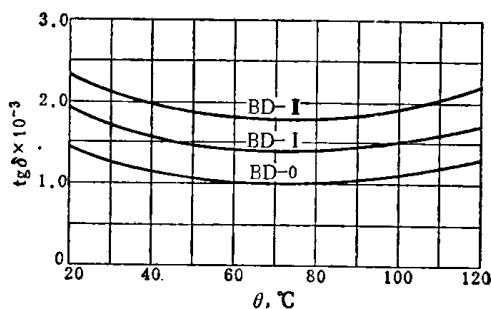


图 29.2-8 高温低损耗纸的 $\text{tg } \delta = f(\theta)$ 标准曲线

电容器纸在常温下化学稳定性很好,但当温度达 $120 \sim 130^\circ\text{C}$ 时会明显氧化,温度高达 $150 \sim 160^\circ\text{C}$ 时即很快分解(但在真空下分解较慢)。因此,制成的电容器芯子必须在低于 135°C 下进行真空干燥和浸渍处理,以防纸的性能变坏。

4.2 塑料薄膜

电力电容器中常用的塑料薄膜有聚丙烯、聚酯、聚碳酸酯薄膜。它们的基本性能见表 29.2-8 及图 29.2-9~29.2-11。

与电容器纸比较,薄膜的机械强度、耐电强度和体积电阻系数都很高,中性和弱极性薄膜的 $\text{tg } \delta$ 很小(参看图 29.2-9), ϵ 及 $\text{tg } \delta$ 几乎与频率无关。

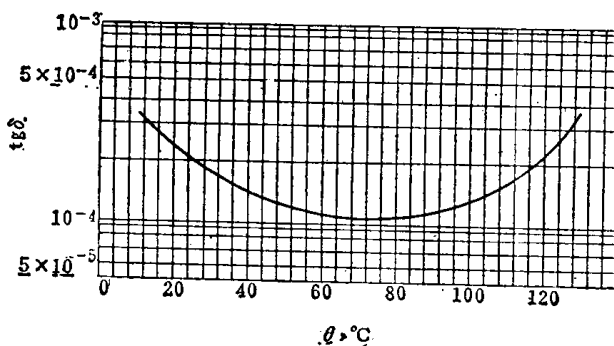


图 29.2-9 聚丙烯薄膜 $\text{tg } \delta = f(\theta)$ 的关系

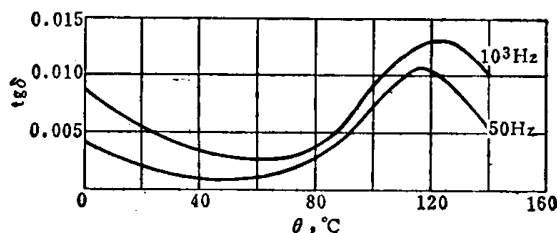


图 29.2-10 聚酯薄膜 $\text{tg } \delta = f(\theta)$ 的关系

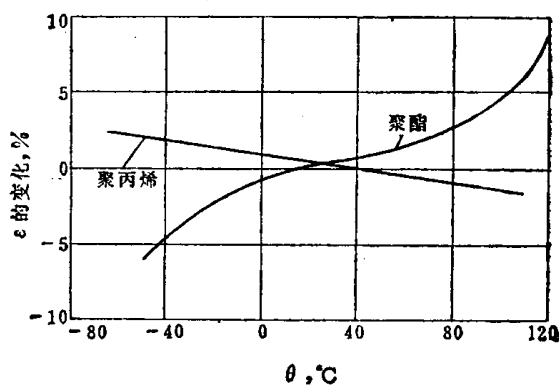


图 29.2-11 几种薄膜的 ϵ 随温度的变化

表 29.2-8 几种塑料薄膜的性能

薄膜名称	密度 g/cm^3	吸潮 %	抗张强度 kgf/mm^2	延伸率 %	收缩率 %	长期工作温度 $^\circ\text{C}$	ϵ (50 Hz)	电容温度系数 $1/^\circ\text{C}$	$\text{tg } \delta$ (50 Hz, 20°C) (不大于)	ρ_v $\Omega \cdot \text{cm}$ (20°C) (不小于)	E_f kV/mm (不低于)	导热系数 $\text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C}$
聚丙烯	0.91	<0.01	纵向>10 横向>14	20~100	2	100	2.2	-2×10^{-4}	0.0004	10^{15}	200	2.2×10^{-3}
聚苯乙烯	1.05	<0.01	4~7.5	2~4		60	2.5	-7×10^{-5}	0.0004	10^{17}	110	8×10^{-3}
聚酯	1.39	0.3~0.4	>14	40~130	3	120	3.2	5×10^{-4}	0.003	10^{16}	160	15×10^{-3}
聚碳酸酯	1.2	<0.01	5~7	100		125	3.0	3.5×10^{-4}	0.002	10^{16}	160	

薄膜的主要缺点是难以浸渍,因此实际中多采用浸渍纸与薄膜组成复合介质,以提高浸渍性能;如采用全薄膜时,可用双面金属化纸作极板(单层薄膜作介质),以引进浸渍剂。此外,这种产品的真空浸渍若采用单台注油、加压及补充加热浸渍等处理工艺,也可提高浸渍效果。

a. 聚丙烯薄膜 其基本性能见表 29.2-8、图 29.2-9 和图 29.2-11。此外还具有化学稳定性及电老化性能好的特点,并可综合利用石油化工产物,节约造纸用的大量木材。它是电力电容器比较理想的固体介质材料。

聚丙烯薄膜与苯甲基硅油浸渍纸复合介质(其中薄膜的厚度比例一般为 60~75%)用于电力电容器时,其工作场强可以提高很多,对于高压移相电容器等产品,可大大改进比特性。此外,这种组合介质还具有耐短时过电压特性好、损耗小、电容稳定、寿命长等一系列优点,因此更适于制造串联、电热和耦合电容器。低压移相电容器若采用聚丙烯薄膜作介质时,必须使薄膜做到足够薄(例如 $10\mu\text{m}$ 及以下)或采用金属化薄膜介质,才能充分发挥其耐电强度高特点,从而改进产品比特性。

b. 聚酯及聚碳酸酯薄膜 其介电系数和体积电阻系数都较大(见表 29.2-8),用于脉冲和直流电容器可以得到较大的绝缘电阻或自持放电时间常数,提高工作温度,并可改进产品比特性。它们在工频下和温度在 $80\sim 100^{\circ}\text{C}$ 时 $\text{tg}\delta$ 较大(参见图 29.2-10),耐局部放电性能较差。

4.3 金属化纸和金属化薄膜

金属化纸和金属化薄膜的主要特点是有自愈性。当介质击穿时,短路电流会使击穿部位周围的金属膜熔化蒸发,从而恢复绝缘。因此金属化纸或金属化薄膜电容器有较高的可靠性,并可提高工作场强;金属膜一般为锌锡或铝,厚度仅 $0.05\sim 0.1\mu\text{m}$,可节约大量铝箔。

双面金属化纸用作电容器油浸渍的单层聚丙烯薄膜电容器极板时,它仅起吸收浸渍剂的作用而不承受电场作用,由于电容器油与聚丙烯薄膜的介电系数几乎相等,其中电场分布也几乎相等;并且薄油层和聚丙烯薄膜的耐电强度都很高,因此,这种电容器的允许工作场强可取得很高,产品比特性可大为改进。

金属化薄膜基本上不吸收水分,当元件电压在 250 伏及以下时,可用来制造干式电容器,但由于它的自愈性有一定限度,因此这种干式电容器容量一般较小,适用于与感应电动机并联作单台分散补偿。

5 组合介质

电力电容器通常多采用组合介质。常用的组合介质是电容器油浸渍纸,此外还发展采用了苯甲基硅油浸渍电容器纸和苯甲基硅油浸渍纸与聚丙烯薄膜组成的复合介质。

组合介质的电气性能与各单一介质的性能有关;此外,还与温度、压力、电场强度和电压作用时间等有关;产品结构(如极间介质厚度、极板面积等)及制造工艺对其电气性能的影响也很大。

5.1 组合介质电气性能参数计算

组合介质介电系数和损耗的常用计算公式见表 29.2-9,其场强计算公式见表 29.2-10。

交流电压下各层介质上的场强与其 ϵ 成反比。由表 29.2-10 中(1)、(2)两式可见,若某层介质的 ϵ 较大,其承受场强就较低。因此,当采用浸渍纸与聚丙烯薄膜复合介质时,应选用介电系数较大的浸渍剂,使浸渍纸的介电系数增大,以充分发挥薄膜能承受高场强的特点。

直流电压下各层介质上的场强与其体积电阻系数成正比。由表 29.2-10 中(7)、(8)两式可见,组合介质场强的分配很有利于提高膜纸复合介质的平均场强,特别在高电压和高温(90°C 及以上)下更好。设介质 1、2 分别为浸渍纸和薄膜,则当温度和工作电压较高时, ρ_{v_1} 及 E_2 都很高, E_1 虽比 E_2 低很多,但 ρ_{v_1} 比 ρ_{v_2} 也低很多,所以其平均场强仍可取得较高,也可充分利用薄膜耐电强度高的优点。因此,膜纸复合介质用于脉冲和直流电容器可提高工作场强,从而大大改善产品的比特性。

5.2 各种因素对组合介质电气性能的影响

各种因素对组合介质电气性能的影响见图 29.2-12~29.2-27 及表 29.2-11 和表 29.2-12。