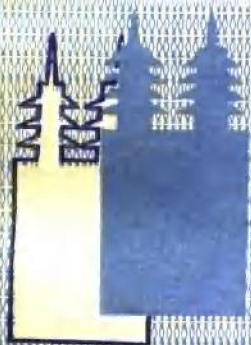


电力电容器 安装运行和检修

刘乾业



电力工业出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了电力电容器的构造原理、技术性能、安装、运行维护和检修等方面的知识，并对用移相电容器进行电力系统无功负荷的合理补偿、电容器组的继电保护和自动装置、以及电容器的电气试验等问题作了论述。此外，还分析了我国移相电容器在运行中的一些问题，提出了加强运行可靠性的措施。

本书可供电力部门和工业企业的电气技术人员和工人在实际工作中参考。

电力电容器安装运行和检修

刘 乾 业

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外大柵坑)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 9 $\frac{1}{2}$ 印张 209千字

1980年4月第一版 1980年4月北京第一次印刷

印数 00001—31140册 每册0.76元

书号 15036·4020

前 言

在实现四个现代化新的长征中，发展电力工业是一项十分迫切的任务。由于电网容量的扩大和电压等级的增多，解决电力网无功补偿不足的问题对保证供电质量和运行的经济性具有十分重要的意义。各地供用电部门反映，迫切需要一本介绍电力电容器方面的书籍，以便有所借鉴。在山西省电力工业管理局、中共临汾地委和临汾地区电业局领导同志的关怀和鼓励下，由于有关同志的大力支持，使这本介绍电力电容器方面的技术书籍能够在较短的时间写成和读者见面。

本书主要论述电力电容器的构造、原理以及安装、运行和检修方面的技术经验，力求做到从总结实践经验着手，能反映七十年代我国电力电容器专业的技术水平，有的放矢地解决一些生产中存在的问题，并适当地介绍一些国外本专业的动态。本书内容以移相电容器为重点，对设计和制造工艺方面的内容，凡与使用部门关系不大的，则予从简。由于串联补偿方面国内已有专著论述，所以本书除对串联电容器作一般介绍外，也不再重复。

在本书编写过程中，承上海、西安、武汉、太原、湘中供电局和广州、桂林供电公司的大力支持和帮助，介绍了运行经验，提供了技术资料。沈阳电业局罗祖鉴同志，武汉供电局李芬辰同志，西安电力电容器厂陈积斌、刘树华等同志，太原工学院王璋、黄东惠同志审阅了全稿，提出了不少宝贵意见，丰富了本书的内容。杨波、侯洪基、师森田等同志为

本书出版，付出了辛勤的劳动，对此表示感谢。

由于作者水平有限，书中的错误和缺点在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作 者

1979年8月

目 录

前 言

第一章 电容器的原理和构造	1
1-1 电力电容器的发展概况	1
1-2 电力电容器的种类	2
1-3 电容器的基本原理	3
1-4 电容器的充电和放电	10
1-5 电容器的连接	14
1-6 电容器中的电场能	16
1-7 电力电容器的绝缘介质	17
1-8 电力电容器元件的结构	26
1-9 电力电容器的外壳和引出线套管	31
1-10 电力电容器内部油热膨胀的补偿	34
1-11 移相电容器	36
1-12 串联电容器	40
1-13 耦合电容器	43
1-14 电热电容器	47
1-15 脉冲电容器	54
1-16 均压电容器	55
1-17 滤波电容器	59
1-18 标准电容器	60
第二章 用移相电容器对电力系统进行无功补偿	63
2-1 电力网无功补偿的基本概念	63
2-2 无功补偿的方式	67
2-3 无功补偿经济当量	73
2-4 配电网中电容器的合理分配	78

2-5	补偿容量的选择	81
2-6	动态无功功率补偿	86
第三章	移相电容器的安装	97
3-1	电容器的运输和保存	97
3-2	移相电容器组的接线	97
3-3	移相电容器室内安装时的技术要求	102
3-4	半露天式电容器室	110
3-5	室外安装的电容器组	111
3-6	低压成套移相电容器柜	111
3-7	电容器组的测量和信号装置	117
3-8	移相电容器组的放电装置	118
3-9	移相电容器组开关设备的选择	126
3-10	用负荷开关投切移相电容器组	129
第四章	移相电容器的运行	131
4-1	移相电容器的环境温度	131
4-2	移相电容器的损失、温升和散热状况	134
4-3	移相电容器在热带、亚热带地区运行的特殊问题	142
4-4	运行电压升高对移相电容器的影响	143
4-5	网络电压波形畸变时移相电容器的工作状况	146
4-6	移相电容器的过电流和过负荷	150
4-7	电容器组投入时的涌进电流	154
4-8	装设电容器组的供电网络中的高次谐波共振过电压	160
4-9	防止谐波共振过电压及解决电容器组严重过负荷的措施	164
4-10	移相电容器组投切过程中引起的操作过电压	167
4-11	异步电动机并联电容器时的自励磁现象	172
4-12	移相电容器在高海拔地区的运行	176
4-13	防止氯化联苯污染环境的措施	178
4-14	移相电容器的运行维护注意事项	180

4-15	其它电力电容器的运行	183
第五章	移相电容器的损坏和修复	186
5-1	移相电容器的寿命和淘汰	186
5-2	移相电容器损坏的规律	188
5-3	移相电容器的爆破事故	190
5-4	移相电容器的检修	196
5-5	移相电容器检修时的真空处理	202
第六章	移相电容器组的保护和自动装置	208
6-1	移相电容器组的保护原则和基本要求	208
6-2	用熔断器保护移相电容器	210
6-3	对保护移相电容器的熔断器的技术要求	213
6-4	保护熔断器的选择	214
6-5	单台熔丝保护的灵敏度	217
6-6	分组熔丝保护效果的探讨	219
6-7	电容器组的相间过电流保护装置	224
6-8	电容器组的零序保护装置	226
6-9	电容器组相差动电流保护装置	230
6-10	电容器组中性线电流平衡保护装置	233
6-11	电容器组的失压保护和过电压保护	239
6-12	电容器组投入瞬间引起电流互感器一次线圈放电 的原因及防止措施	240
6-13	电容器组的自动投切装置	245
第七章	电力电容器的试验	253
7-1	移相电容器的试验项目和试验标准	253
7-2	绝缘电阻和吸收比的测量	258
7-3	电容量的测量	262
7-4	介质损失角正切值的测量	267
7-5	耐压试验	273
7-6	电容器起始游离电压的测量	277

7-7	其它电力电容器的试验标准	284
附录 1	移相电容器组自动投切装置实例	288
附录 2	电容器组放电用的单相电压互感器的 技术数据	292
附录 3	液体介质十二烷基苯的技术性能	292
附录 4	采用十二烷基苯作浸渍剂的移相电容器的 技术数据	293
附录 5	日本日新电机株式会社制造的大容量移相 电容器简介	294

第一章 电容器的原理和构造

1-1 电力电容器的发展概况

电力电容器的发展历史并不很长。从1899年第一次试制成5千伏的纸质电容器，到1926年才实现了工厂化生产和正式在电力网中应用，迄今不过几十年的历史。近二、三十年来，由于大电厂和远距离输电系统的建立，新兴科技领域的发展，电力电容器已成为现代化电力系统，国防建设尖端技术、工业企业和交通运输电气化方面不可缺少的元件。从国外情况来看，美国和苏联七十年代电力电容器的年产量分别为五十年代年产量的四倍和五倍，大约每隔10年翻一番。工业比较发达的国家中电力电容器的安装容量与发电设备装机容量之比，大约为40~50%左右，例如美国1969年为43%，日本1970年为49%，苏联1964年为54%。五十年代初期移相电容器的最大单台容量为25~50千乏，六十年代做到了最大单台容量为100千乏，七十年代以来，由于采用了聚丙烯薄膜和纸的组合介质，美国和西德生产的移相电容器和电热电容器，最大单台容量已达到600千乏。西欧国家一般认为单台容量以100~200千乏左右技术经济上较合理。日本还生产一种柜式的大容量移相电容器，箱壳厚5~10毫米，装有油量调节器，其最大单台容量已达6667千乏。

电力电容器工业的迅速发展，还表现在品种增多，新材料、新工艺的采用和用途的日益广泛等方面。目前，世界上在电力电容器生产的主攻方向是降低单位千乏的重量（即降低比特性）。例如矿物油浸纸介质的移相电容器的比特性约

为2~2.3公斤/千乏；而聚丙烯薄膜和纸复合介质的移相电容器的比特性降到0.35公斤/千乏左右，因此前者要用6台产品才能顶后者1台产品。在电容器的浸渍剂方面，氯化联苯曾经风行一时，但由于对环境的污染问题没有解决，目前世界上大部分国家对此持限制和缩小使用范围的趋势。我国和日本等国家则规定不再使用氯化联苯作浸渍剂。

解放以前，我国不能生产电力电容器。解放后，在第一个五年计划期间建立了第一座现代化的电力电容器制造厂——西安电力电容器厂。随着我国电力工业的发展，电力电容器的制造厂已有三十余家，生产的电力电容器有移相、串联、电热、耦合、均压、滤波、脉冲、标准等八个系列。此外，还能生产110~750千伏的冲击电压发生器。我们深信，随着我国社会主义现代化建设的发展，电力电容器的制造能力和技术水平必将日益提高。

1-2 电力电容器的种类

电力电容器的种类很多，按照其安装的方式划分，可分为户内及户外式两种；按其相数划分，可分为单相及三相两种，除了低压的移相电容器外，其余都是单相的；按其运行的额定电压划分，可分为高压（1.05、3.15、6.3、10.5千伏及以上）和低压（0.23、0.4、0.525千伏）等几种。从构造上来讲，按电容器外壳材料的型式划分，可分为金属外壳、瓷绝缘外壳、胶木筒外壳等数种；按电力电容器内部浸渍液体来分，又可分为矿物油、氯化联苯、蓖麻油、硅油、十二烷基苯及其它不燃性油等新型浸渍剂等数种。

从电力电容器的工作条件来讲，大致可归纳为以下四大类，它们的特点是：

(1) 在工频交流电压下, 长时间运行的电容器, 包括移相、串联和耦合电容器均属此类。这类型的电容器一般电流较大, 导电部分按电流密度设计, 介质损失也较大、电容器的结构决定于散热条件, 介质的工作电场强度不能太高。

(2) 在直流电压及微小的交流分量下长期运行的电容器, 这种直流电容器, 包括滤波电容器在内, 其通过的电流较小, 导电部分的截面主要考虑机械强度, 介质损失和发热很小, 允许介质具有较高的工作电场强度。

(3) 在中频(150~10000赫)交流电压下, 长时间运行的电容器。这种电容器主要是电热电容器, 其工作电流很大, 介质损失及导电部分的损失也很大, 需要采取特殊的散热措施, 如水冷等, 其介质的工作电场强度, 根据频率的大小来决定, 低于移相电容器。

(4) 在短时间冲击电压或振荡电压作用下的电容器, 包括脉冲、均压和标准电容器, 一般情况下其工作时间很短, 功率损失和发热不大, 其介质的工作电场强度一般高于上述其它三类的电容器。

1-3 电容器的基本原理

1. 平板式电容器的原理

任何两块金属导体, 中间用不导电的绝缘材料隔开, 就形成一个电容器。图1-1(a)是平板电容器的构造原理示意图。被绝缘材料隔开的金属板叫做极板, 可以通过电极接到电路中去。用以隔开极板的绝缘材料叫做绝缘介质。电容器在电路中的符号如图1-1(b)所示。电容器的基本性能是储存电荷, 如图1-2所示。当电容器的两极板接上电源时, 由于电场力的作用, 与电源正极连接的电容器的极板1上将出

现正电荷，与电源负极连接的电容器极板 2 上将出现负电荷，两个极板上带电量是相等的。这样，在极板间的介质中建立了电场，电容器储存了一定量的电荷和电场能量。

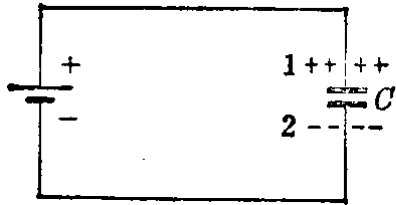
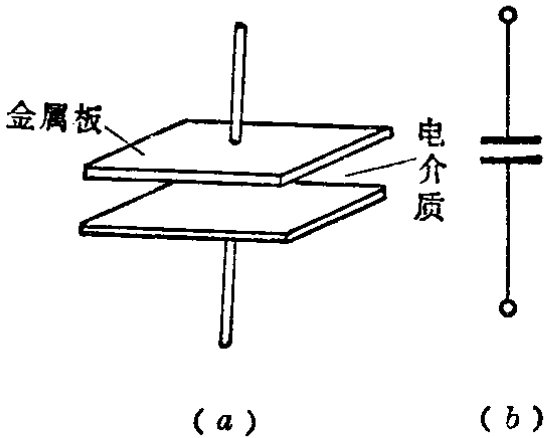


图 1-1 最简单的平板式电容器 图 1-2 电容器储存电荷的原理
(a)构造示意图；(b)电容器符号

实践证明，电容器极板上电荷电量 Q 的大小，和加于电容器两端的电压 U_c 的大小成正比。也就是说，加于两个极板间的电压 U_c 愈高，两个极板上积存的电荷也愈多，即 Q 愈大。这个关系可用式 1-1 表示：

$$Q = CU_c \tag{1-1}$$

或
$$C = \frac{Q}{U_c} \tag{1-2}$$

式中 C ——电容，法；
 Q ——电荷电量，库；
 U_c ——电容器端电压，伏。

比例常数 C 叫做电容器的电容量（简称电容），是衡量电容器储存电荷能力的标准。电容量的单位是法（法拉），用符号 F 表示，实用上由于法这个单位太大，通常不采用，一般用微法（ μF ）或微微法（ $\mu\mu F$ ）做单位（ $1\mu F = 10^{-6} F$ ，

$1\mu\mu F = 10^{-12} F$)。

【例】 电容器的电容量为10微法，计算连接在1000伏直流电源上时所带的电荷量。

解： $Q = CU_c = 10 \times 10^{-6} \times 1000 = 0.01$ 库

有时也采用厘米做为电容器的绝对单位，1厘米的电容是一个半径为1厘米孤立的金属球的电容量，这种电容单位在数值上与1微微法相近。

$$1\text{厘米} = 1.11\mu\mu F = 1.11 \times 10^{-6} \mu F$$

或 $1\text{微法} = 9 \times 10^5 \text{厘米}$

2. 电容器的电容量

电容器电容量 C 的大小，是由电容器本身几何尺寸的大小和两个极板间的绝缘介质的特性来决定的，与外界条件（如所加电压的大小）无关。如平板电容器极板的面积为 A ，两平行极板间的距离为 d ，从理论分析和实践证明：

（1）电容器的极板面积 A 愈大，能容纳的电荷量愈多，则电容量 C 也愈大。电容量 C 的大小和极板面积 A 成正比。

（2）当两个极板距离相隔愈近，即 d 愈小时，两个极板上的异性电荷之间的互相吸引力就愈大，使电容器储存电荷的能力增大。电容量 C 和极板间的距离 d 成反比。

（3）实践还说明，当同样的 A 和 d 恒定，两个极板间的绝缘介质不同时，它的电容量都比用空气做介质时的电容量要大。电容量 C 和 A ， d 以及介质种类的关系可用（1-3）式表示：

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (1-3)$$

式中 C ——电容量，法；

A ——每极板的有效面积，米²；

d ——两极板的距离，米；

ε ——电介质的介电系（常）数，法/米。

实用上把各种绝缘材料的介电系数 ε 与真空中的介电系数 ε_0 作比较，其比值 ε_r 叫做相对介电系数，因此：

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (1-4)$$

式中 $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9} = 8.86 \times 10^{-12}$ 法/米。

显然，当极板间为真空时， $\varepsilon_r = 1$ ；为空气时， $\varepsilon_r = 1.00058$ 。由于与真空的 ε_r 误差不大，所以实用上空气的 ε_r 也按 1 来计算。各种绝缘介质的相对介电系数的数值如表（1-1）所示：

表 1-1 各种绝缘介质的相对介电系数

绝 缘 介 质	相对介电系数 ε_r	绝 缘 介 质	相对介电系数 ε_r
真 空	1	聚丙烯薄膜	2~2.2
空 气	1.00058	聚 乙 烯	2.2~2.4
氮 气	1.006	聚氯乙烯	3~3.5
六氟化硫	1.002	聚 酯	3.2
二氧化碳	1.00098	有机玻璃	3~3.6
变压器油	2~2.2	环氧树脂浇铸品	3.8
电容器油	2.1~2.3	云 母	4~7.5
三氯联苯	5.2	瓷	6~6.5
蓖 麻 油	4.2	胶木层纸	2.5~4
甲基硅油	2.2~2.8	石 蜡	2.1~2.5
聚四氟乙烯	2~2.2	玻 璃	5.5~10
苯甲基硅油	2.63~2.8	橡 胶	2~3
聚异丁烯	2.2	纯 水	81
烷 基 苯	2.25~2.3	甘 油	57
纸	3.0~3.5	木 材	4.5~5
电容器纸	6.5	钛 酸 钡	3000~8000
油浸电容器纸	3.2~4.4		

将 ε_0 值及 ε_r 代入(1-3)式, 则得:

$$C = \frac{\varepsilon_r A}{36\pi d \times 10^9} \quad (1-5)$$

式中符号含义与(1-3)式相同。

从1-5式可以说明所有的电容器(除通信上用的可变电容器外)在制造出来以后, 由于几何尺寸和作为介质的绝缘材料都不能改变(除内部损坏和绝缘介质老化等原因外), 它的电容量就基本上不会改变了。为了增大平板电容器的电容量, 除了减少极板间距离和选用介电系数较大的介质外, 最常用的办法是增大极板的有效面积。

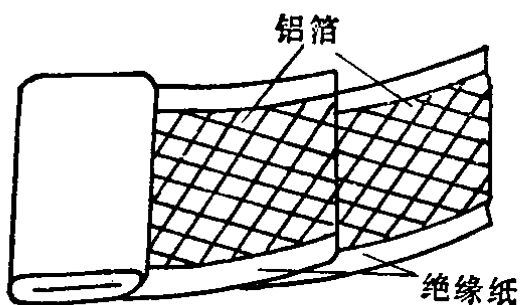


图 1-3 卷绕式电容器元件

实际使用中的电容器是卷绕式电容器, 如图(1-3)所示。它的电容近似值等于该电容展开成平面长条时的一倍, 用(1-6)式来表示:

$$C = \frac{\varepsilon_r A}{18\pi d \times 10^9} = \frac{\varepsilon_r bl}{18\pi d \times 10^9} \quad (1-6)$$

式中 b —— 极板宽度, 米;

l —— 极板长度, 米。

3. 电容器绝缘介质的有效体积

设电容器绝缘介质的工作电场强度为 E , 绝缘介质的有效体积为 V , 则

$$E = \frac{U}{d} \quad (1-7)$$

$$V = Ad \quad (1-8)$$

式中 E —— 电容器介质的工作电场强度，千伏/米；

U —— 电容器工作电压，千伏；

V —— 绝缘介质有效体积，米³。

(1-5) 式又可写成：

$$C = \frac{V \varepsilon_r E^2}{36\pi U^2 \times 10^9} \quad (1-9)$$

移项得：

$$V = \frac{36\pi U^2 C \times 10^9}{\varepsilon_r E^2} \quad (1-10)$$

从 (1-10) 式中说明了电容器绝缘介质的有效体积 V 和介电系数 ε_r 成反比，和工作电场强度 E 的平方成反比，因此采用介电系数大的材料及提高电容器的工作电场强度，可以有效的减少绝缘介质的消耗量及缩小电容器的体积。

4. 电容器的电抗值

在直流回路中，电容器除了充放电过程中的暂态电流外，没有稳态电流通过，而在交流回路中，则有稳态的电容电流，按欧姆定律：

$$I = \frac{U}{X_c} \quad (1-11)$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1-12)$$

式中 I —— 电容电流，安；

U —— 电压，伏；

X_c —— 电容电抗，欧；

C —— 电容，法；

ω —— 角速度；

f —— 频率，赫。

5. 电容器的无功功率和介质损失

实际的电容器可用图1-4 (a) 的等值电路来表示。因电容器在运行中产生有功损失的关系, 其电流和电压的相位差小于 90° , 如图1-4 (b) 所示。

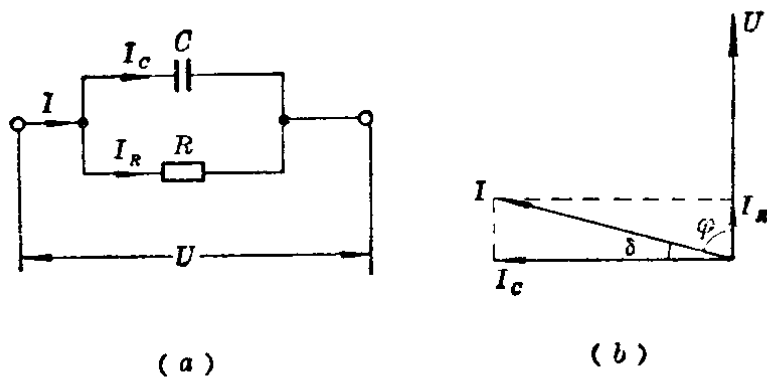


图 1-4 电容器的等值电路和向量图
(a)等值电路; (b)向量图

电容器的无功功率和有功功率损失分别为:

$$Q = UI \sin \varphi = 2\pi f C U^2 \quad (1-13)$$

$$P_s = UI \cos \varphi = Q \tan \delta \quad (1-14)$$

式中 Q ——电容器的无功功率, 乏;

P_s ——电容器的有功功率损失, 瓦;

φ ——电压和电流的相位角;

δ ——电容器的介质损失角, $\delta + \varphi = 90^\circ$ 。

介质损失角的正切值为:

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R}}{U \omega C} = \frac{1}{\omega C R} \quad (1-15)$$

式中 I_R ——有功电流分量, 安;

I_C ——无功电流分量, 安;

R ——电容器的等效电阻, 欧。