

国外机械工业基本情况

电 力 电 容 器

西安电力电容器研究所 石春让主编

机 械 工 业 出 版 社

电 力 电 容 器

西安电力电容器研究所 石春让主编

机 械 工 业 出 版 社

(京) 新登字 054 号

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电容器 / 石春让编. —北京: 机械工业出版社, 1995.5

ISBN 7-111-04547-5

I. 电… II. 石… III. 电力电容器 IV. TM531.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 04081 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 陈瑞藻 版式设计: 李松山

西安外国语学院印刷厂印刷

1995 年 5 月第 1 版 · 1995 年 5 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 印张 2 · 45 千字 28 页

001 ~ 300 册

定价: 8.00 元

出 版 说 明

机械工业肩负着为国民经济各部门提供实用、先进技术装备的重任。为适应社会主义市场经济体制的发展要求，必须大力发展机械工业。上质量、上品种、上水平，提高经济效益，是今后一个时期机械工业的战略任务。为了借鉴国外机械工业的发展道路、措施方法和经验教训，了解国外机械工业的生产、技术和管理水平；以便探索我国机械工业在社会主义市场经济体制下自我完善的发展道路，我们组织编写了第四轮《国外机械工业基本情况》。这一轮是在前三轮的基础上，围绕我国机械系统各行业发展战略，针对我国机械工业技术发展的实际要求，全面系统地介绍国外机械系统各行业、企业、生产技术和科学研究等方面的综合情况，着重报道了国外机械工业 80 年代中后期到 90 年代初期的水平及到本世纪末的发展趋向。

第四轮《国外机械工业基本情况》共 60 多分册，编写人员达 500 余人。本书为《电力电容器》分册，由机械工业部西安电力电容器研究所石春让主编，房金兰、沈文琪、张彬、胡守愚参加了本书编写工作。责任编辑：陈瑞藻。

机械工业部科技信息研究院

目 录

第一章	电力电容器国外发展近况	1
第二章	高压全膜并联电容器	7
第三章	自愈式并联电容器	12
第四章	电容式电压互感器	16
第五章	其他电容器	18
第六章	国外电力电容器主要生产厂家简介	22
参考文献		25

第一章 电力电容器国外发展近况

1 国外电力电容器的发展特点

80 年代末 90 年代初国外电力电容器的发展可归纳为如下几个特点:

1.1 高压产品向高压全膜, 低压产品向自愈式方向发展

随着电力系统规模扩大, 电力电容器的安装容量日益增加。这就要求提高电力电容器的可靠性和经济性, 降低损耗, 简化维护和防止环境污染。国外许多制造高压并联电容器的公司进行了以采用新的固体和液体介质材料为特点的改进和研究, 制造出了运行可靠的新型电容器, 大幅度提高了技术经济效益和生产能力。80 年代初期, 各国制造动向大致趋于一致。即用聚丙烯薄膜部分地、进而全部地取代电容器纸, 用具有优良物理化学性能(毒性、倾点、闪点、粘度、相容性和吸气性等)和电气性能(损耗、电气强度、电容稳定性等)的液体介质代替有环境污染作用的 PCB。经过几年的过渡, 到 90 年代初, 高压电力电容器已全部或大部分采用全膜介质。代表先进水平的欧美国家全膜电容器制造技术有了大幅度的提高。

目前欧洲各国、美国和日本等国开发了各种类型的低压并联电容器, 自愈式电容器出现了多样化发展的格局。但从介质结构角度来看总的倾向是, 对于额定电压 400 V 及以下的交流电容器多采用浸渍式或干式金属化膜结构, 部分厂家则生产以双面金属化纸作极板, 以单层聚丙烯膜作介质的全浸渍式结构。总之近年来自愈式低压电力电容器的生产在世界上方兴未艾。在其发展中先后解决了电容减小与极板腐蚀问题、浸渍剂的改进与干式化问题、抗涌流与过压力保护等问题。1988 年初自愈式并联电容器的国际标准 IEC 831-1、831-2 正式颁布, 自愈式低压并联电容器朝进一步完善结构和改进性能的方向发展。不仅如此, 自愈式技术正在向高压并联、储能和耦合电容器等领域发展。

1.2 向单台大容量方向发展

伴随着系统规模和变电容量的增大, 电容器及其装置有向大容量、紧密型、高可靠性方向发展的趋势。

日本日新公司为了增大电力电容器的容量, 在产品设计方面有两次大的改革。一是密集型(也称集合式)产品, 带小箱壳的电容器单元在金属架上组装后, 放到一个大的油箱内, 差压保护, 内置放电线圈。其特点是生产方便, 便于修理。但其成本高, 内部结构复杂, 很快被淘汰。在此产品基础上, 日新公司又开发出了不带小箱壳的缩小型电容器。系将大元件组成的大心子通过电气连接后置于油箱内, 也采用差压保护, 内置放电线圈。其特点是成本低, 比特性好, 便于向特大容量发展, 但要求可靠性高。

图 1-1 所示为日新公司电容器最大单台容量及容积变迁图。目前, 日新公司缩小型电容器的标准单台容量为 6667 kvar, 并且于 1991 年已批量生产单台 22 kV, 30 Mvar 的全膜

大容量电容器。

大容量电容器与组架式电容器装置相比, 占地面积可缩小到 $1/3 \sim 1/4$; 因带电体完全被遮盖, 安全性大大提高; 可靠性提高; 而且耐盐污、耐震性提高; 维修及检查工作明显简化。

日本缩小型电容器与其它设备之间的连接, 常有三种方法: 用套管在空气中相连接; 用电缆连接; 直接与开关相连接。其中第一种方法高度较高, 而第三种方法较紧凑。电容器的配置, 一般当容量在 20 Mvar 以下时, 常制成三相的; 而在 30 Mvar 以上时, 常用几台组成。

欧美几乎不生产这种大容量电容器产品, 但在电容器安装方面却增大了容量。美国东部 PJM 电网的 230 kV 电容器单组为 100 Mvar, 采用单台 13.8 kV, 200 kvar 的电容器单星形连接, 10 串 18 并组成, 每段并联容量为 3600 kvar。瑞典 13 kV, 16212 kvar 三相星形连接电容器组, 选用 7.56 kV, 386 kvar 的电容器, 14 并组成, 每相容量为 5404 kvar。最大单台容量已提高到 400~600 kvar。

1.3 向成套装置方向发展

为了满足用户的不同要求和提高竞争力, 大多数公司都能提供包括控制和保护设备的电力电容器成套装置。例如美国的 13.8 kV, 50.4 Mvar 的并联成套装置, 具有分段限压保护, 喷逐式熔断器保护等, 日本的 66 kV 可变容量电力电容器是将变压器与电容器组合而成, 额定容量 20 Mvar, 分十段在 5~20 Mvar 间可调。美国 Cooper 公司有三种高压电容器装置: 即柱上式、金属箱封闭式和地面露天式。

日本日新公司 275 kV 并联滤波器具有国际先进水平, 其电容器以牛皮纸板构成 200 kV 的对地绝缘, 以交错卷元件使绝缘设计合理和小型化。环氧树脂绝缘衬垫使引出部分小型化。滤波电抗器加装氧化锌避雷器使绝缘水平降低。电流互感器内藏避雷器使之密集化。其结果是设备所占空间缩小, 带电部分密封, 安全性提高。有源滤波器 (Active Filter) 是用变频器控制 (或消除) 高次谐波电流的装置。同时, 国外也有采用 L-C 滤波器和有源滤波器并用的方法, 缩小滤波设备占地面积以及与环境协调等。

对于 HVDC 输电技术, 欧美国家的滤波电容器均与并联电容器一样发展了全膜介质浸 PXE, M/DBT 等新液体介质, 结构上采用铝箔压花、突出、折边, 内熔丝保护。日本开发了缩小型大容量交流滤波电容器和直流滤波电容器。瑞典和美国联合开发了全封闭 GIS

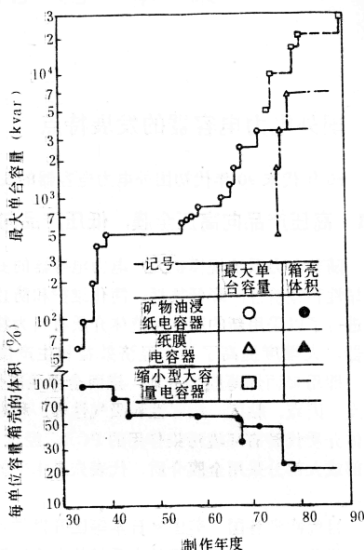


图 1-1 电容器最大单台容量和箱壳容积的变化

型超高压交流滤波电容器。

美国西屋公司及日本三菱电气公司已研制出新型静态无功发生器 (SVG), 该装置具有零功率输出, 容性无功输出和吸收三种工况, 与 SVC 相比, 体积小, 投资省, 响应速度快。松下公司的 6 kV 静止型电压调整器可进行从容性 1000 kvar 到感性 500 kvar 无功容量的连续控制。

2 电力电容器介质发展概况

介质材料的进步是提高电容器性能的关键。几年来, 介质材料有了较大发展, 主要表现在:

2.1 薄膜

用于全膜电容器的聚丙烯薄膜 (简称 PP 膜) 是一种专用电薄膜, 这种薄膜必须有很高的纯度, 很高的耐电强度和厚薄均匀度, 等规度应在 95% 以上, 灰分的含量应低于 50 mg/kg。为了使膜与膜、膜与铝箔之间不发生相互粘贴, 在层间始终能保持适当的油隙, 全膜电容器应采用表面粗化的薄膜, 膜的表明粗糙度应在 $0.20 \sim 0.50 \mu\text{m}$ 之间。

为了改善膜的性能, 国外许多专家在材料方面作了大量研究和试验, 有的在膜中加入添加剂。

法国 BOLLORE 生产的全膜电容器用双面粗化聚丙烯薄膜 (PPR) 能改善液体介质在膜层之间及膜和铝箔极板间, 特别是在高度压紧区域的渗透能力, 从而达到电容器更快浸渍, 可不用压花铝箔。对于单面粗化膜, 在卷制中一定要注意防止“光对光”, 而使用双面粗化膜 (PPR) 则没有这一顾虑。PPR 膜在两个方向均有较低的收缩率, 因此在电容器浸渍前的热烘期间, 厚度变化比吹塑膜要小, 所以更易浸渍。热烘后, 电容器元件内 PPR 膜很少起皱纹。膜的结晶度取决于其生产过程并随电容器热处理温度的变化而变化。膜的直流介电强度也受热处理的影响。PPR 膜与吹塑膜相比较, 其结晶度和介电强度在热处理前和热处理后均优良, 有足够的电气强度。PPR 膜与 M/DBT 及 PXE 有良好的相容性, 浸渍均匀, 从而可改善电容器的局部放电性能。

日本吴羽化学公司生产一种医用聚偏氟乙烯薄膜 (简称 PVDF 或 PVF2 薄膜), 用它制造的直流电容器具有优异的性能, 为产品小型化开辟了一条新路。日本和美国近年来在直流高压储能、滤波方面大量发展 PVDF 膜电容器。表 1-1 列出日本吴羽化学工业公司的 KDC-15 型 PVDF 膜电容器的性能参数, 它用在手提式心脏起搏器上。

聚偏氟乙烯, 商品名为 KF 薄膜 (日本吴羽化学工业公司)。Kynar 薄膜 (美国 Pennwalt 公司) 和 Dulite 薄膜 (美国 Du Pont 公司), 是目前介电常数最高的有机介质薄膜, 最高值达 11~14, 而介电强度与聚酯薄膜 (PET 膜) 相近。这种膜的结晶度为 60%~80%, 密度为 $1.75 \sim 1.78 \text{ g/cm}^3$, 结晶熔点在 170°C 左右, 热分解温度 $> 316^\circ\text{C}$, 可在 $-10 \sim +70^\circ\text{C}$ 下长期使用。它不吸水, 耐大气和臭氧的腐蚀, 不会因材料老化而影响介电性能。表 1-2 列出其电性能。

表 1-1 日本吴羽化学工业公司 PVDF 膜电容器

型号	标称 电容量 (μF)	电压 (kV) (DC)	绝缘 电阻 (M Ω)	使用 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	耐电压 (kV, 1s)	充放电 寿命 (次)	尺寸 (mm)	重量 (kg)
CF-540kT	40	5.0	140	-5~45	6	5000	50×90×145	1.07

表 1-2 PVDF 薄膜的电性能 (日本吴羽化学工业公司)

材料 种类	频率 (Hz)	介电常数 (ϵ)	损耗角正切 ($\lg\delta$)	介电强度 (连续加压法)	体积比电阻 (ρ_v)
未拉伸 PVDF 膜	60	9.5	0.049	180 V / μm (厚 0.07mm)	$3 \sim 6 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$
	10^3	9.4	0.018		
	10^4	9.3	0.014	40 V / μm (厚 0.35mm)	
	10^5	8.9	0.059		
	10^6	7.4	0.152		
双向拉伸 PVDF 膜	60	11.0	0.012	150 V / μm (交流, 厚 0.02mm) 400 V / μm (直流, 厚 0.02mm)	$1 \sim 5 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$
	10^3	10.7	0.015		
	10^6	7.0	0.22		

2.2 浸渍剂

经过几年的开发研究和筛选, 目前苯基甲苯 (M/DBT) 是世界上普遍采用的高压全膜电容器的优良浸渍剂。表 1-3 列出目前电力电容器用浸渍剂的主要性能。

表 1-3 目前常用电力电容器用浸渍剂的主要性能

序号	测定项目	浸渍剂			试验方法
		SAS-40	M/DBT	PXE	
1	外观	无色透明	透明微黄	透明	GB 1981-89
2	密度 (g/cm^3) (25 $^{\circ}\text{C}$)	0.991	1.0035	0.988	SY 2206-76
3	折光率 (25 $^{\circ}\text{C}$)	1.5690	1.5770	1.563	ZBE 38001-89
4	比色散 (25 $^{\circ}\text{C}$)	200	205	193	
5	闪点 ($^{\circ}\text{C}$) (闭口)	130	132	142	GB 261-88
6	酸值 (mg KOH/g)	0.0032	0.0040	0.0050	GB 264-88
7	凝固点 ($^{\circ}\text{C}$)	<-70	<-67	<-40	GB 510-88
8	运动粘度 (mm^2/s) 40 $^{\circ}\text{C}$ -40 $^{\circ}\text{C}$	2.64 51.1	3.53 348	5.10 15000	GB 265-88
9	介电常数 (ϵ) (80 $^{\circ}\text{C}$)	2.50	2.59	2.51	GB 5654-85
10	介质损耗因数 ($\tan\delta$) (80 $^{\circ}\text{C}$)	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	2.5×10^{-4}	
11	体积电阻率 (ρ_v) ($\Omega \cdot \text{cm}$) (80 $^{\circ}\text{C}$)	2.0×10^{15}	9.0×10^{14}	1.0×10^{13}	
12	介电强度 kV (2.5 mm 间距)	> 73	66.2	69.6	GB 507-86
13	析气性 (析气速率) ($\mu\text{L}/\text{min}$)	-157	-147	<-110	SY 2664-80
14	芳香度	0.672	0.645	0.44	理论计算值

这里应该着重介绍一种新型绝缘油 SAS-40。SAS-40 是日本石油化学株式会社于 1989 年开始研究的新型绝缘油，已于 1994 年 7 月在美国德克萨斯州批量生产，年产量可达 4000 t。SAS-40 由单苄基甲苯与二苄基乙烷掺合而成，二者比例为 59% : 38%，在主成份单苄基甲苯中，邻位、间位、对位三种异构体同在，而以间位（占 32%）和对位（占 22%）为主。

SAS-40 最突出的优点是芳香度高，粘度小，凝固点低，这三项性能是目前所使用的绝缘油中最优的。浸渍 SAS-40 的模型电容器比其它绝缘油模型电容器的耐过电压能力强，在电热综合作用下寿命长。因此有关专家认为 SAS-40 性能稍优于 M / DBT，是全膜电容器更优良的浸渍剂，有可能在今后获得广泛应用。

表 1-4 列出 SAS-40 及 M / DBT 介电性能与温度的关系。

表 1-5 列出 SAS-40 及 M / DBT 热老化后性能测试结果。

表 1-4 SAS-40 及 M / DBT 介电性能与温度的关系

测试温度 (℃)		40	60	80	90	100	
处理前 SAS-40	ε	2.55	2.53	2.49	2.47	2.46	
	$\lg \delta \left(\times 10^{-4} \right)$	2.6	3.3	6.6	8.6	12.0	
	$\rho_v \left(\Omega \cdot \text{cm} \right)$	—	3.1×10^{14}	2.5×10^{14}	2.2×10^{14}	1.6×10^{14}	
处理后	SAS-40	ε	—	2.53	2.50	2.49	2.47
		$\lg \delta \left(\times 10^{-4} \right)$	—	1.0	2.0	2.8	4.0
		$\rho_v \left(\Omega \cdot \text{cm} \right)$	—	3.7×10^{15}	2.0×10^{15}	1.6×10^{15}	9.9×10^{14}
	M / DBT	ε	2.64	2.61	2.59	2.56	2.55
		$\lg \delta \left(\times 10^{-4} \right)$	0.4	1.0	2.0	2.8	3.6
		$\rho_v \left(\Omega \cdot \text{cm} \right)$	—	1.8×10^{15}	9.0×10^{14}	6.9×10^{14}	5.5×10^{14}

表 1-5 SAS-40 及 M / DBT 热老化后性能测试结果

浸渍剂		SAS-40			M / DBT		
测试温度 (°C)		60	80	100	60	80	100
老化前	ε	2.53	2.50	2.47	2.61	2.59	2.55
	$\lg \delta (\times 10^{-4})$	1.0	2.0	4.0	1.0	2.0	3.6
	$\rho_v (\Omega \cdot \text{cm})$	3.7×10^{15}	2.0×10^{15}	9.9×10^{14}	1.8×10^{15}	9.0×10^{14}	5.5×10^{14}
	酸值 (mgKOH / g)	0.0032			0.0040		
	环氧含量 (%)	0.55			0.77		
老化后	ε	2.56	2.53	2.50	—	2.59	2.55
	$\lg \delta (\times 10^{-4})$	1.0	2.0	4.0	—	5.0	8.2
	$\rho_v (\Omega \cdot \text{cm})$	9.1×10^{14}	4.4×10^{14}	3.2×10^{14}	—	2.8×10^{14}	1.4×10^{14}
	酸值 (mgKOH / g)	0.0079			0.0048		
	环氧含量 (%)	0.53			0.77		

3 工艺技术发展概况

随着介质材料的改进,相应的工艺也有所变化,主要表现在以下方面:

铝箔延伸夹接 系电容器元件卷绕时,铝箔延伸到介质边缘之外,并将其用夹子夹接。

低温钎焊 用熔点低于薄膜端部损坏温度的焊料进行延伸铝箔的钎焊连接。

二氧化碳保护自动焊 适用于薄钢板焊接,实现自动化操作,提高外壳焊接质量。

自动氩弧焊 用氩气作为保护气体的焊接方法,适用于不锈钢、铝外壳的焊接。

氨质谱检漏 美国电容器制造厂最先采用的检漏方法,系用氨质谱仪探测电容器渗漏部位。

4 测试方法及其他

电容器局部放电特性的好坏是衡量产品质量的一项非常重要的指标。局部放电时,由于分子的激烈撞击,气流的形成和发展,液体的流动以及固体材料的微小开裂会发出声波。电容器元件中放电产生的超声波经过固体介质(膜、铝箔)、液体介质和钢板可以传播到吸附在外壳的超声仪的探头上。美国西屋公司开发了超声波测量装置,用以检测大容量的局部放电,应用效果良好。

另外,近年来计算机技术迅速发展。这样,在电力电容器的设计、生产、科研、运行控制方面都广泛应用计算机技术。

第二章 高压全膜并联电容器

1 引言

国外全膜介质高压并联电容器有如下性能特点:

(1) 有功损耗低, 仅 $0.08 \sim 0.3 \text{ W/kvar}$, 相当于纸介质电容器的 $1/20 \sim 1/30$, 膜纸复合介质电容器的 $1/5 \sim 1/8$, 在电容器的运行中可节省大量电能。

(2) 温升低, 使用寿命长。

(3) 体积小、重量轻、占地面积小, 特别适用于安装在面积狭小的地方。

(4) 箱壳发生爆破的几率低。

(5) 生产周期短, 生产电容器的能耗低。

为了获得好的介质稳定性和长的寿命, 液体介质方面正在广泛采用苜基甲苯 (M/DBT 或称 C101), 因为它的低温和高温性能均比二芳基乙烷 (PXE) 好, 尤其是在低温下, 用它浸渍的全膜电容器局部放电起始电压和熄灭电压都比 PXE 有大幅度提高。高压并联电容器一般采用聚丙烯薄膜, 各国对薄膜的研究很多, 以美国 GE 公司为例, 其薄膜厚度有 13 种, 最薄 $8.13 \mu\text{m}$, 最厚 $25.4 \mu\text{m}$ 。

各国对高压全膜电容器的研究开发向大容量、高场强方向发展。以 GE 公司为例, 场强为 $67 \text{ V}/\mu\text{m}$ 的产品通过了 $1.15U_n$, 30°C 下, 40000 h; $1.3U_n$, 75°C 下, 2000 h 长时间的寿命试验, 外推到额定电压下的实际寿命为 20 年。其元件电压及场强的发展过程见表 2-1。

表 2-1 GE 公司产品元件电压及场强的进展

年份	1978	1982	1987	1989	1991 (科研)
元件电压 (V)	1664	1811	1911	2000	2400
场强 ($\text{V}/\mu\text{m}$)	48.7	55	59.4	67.5	78.7

2 结构

国外高压全膜电容器的元件采用双面粗化膜或单面粗化膜, 或二者搭配方式, 采用二层或三层膜结构。铝箔压花, 折边和延伸, 铝箔延伸部分采用夹接或焊接。美国西屋公司认为铝箔折边后, 其边缘承受过电压能力可提高 40%, GE 公司认为可提高 20%, 奥地利 KAPSCH 公司认为铝箔折边后边缘场强可降低 50%~75%, 日本东芝公司的研究也表明了这一点。由于采用铝箔延伸结构其效果比铝箔折边还要好, 所以另外的电容器公司也有采用铝箔折边和铝箔延伸相结合的结构。

国外有的厂家采用聚丙烯厚片做心子的夹板, 用较厚的聚丙烯带在斜压床上热压封装,

不需另加紧箍。单相电容器多设计成双套管出线，一般均允许卧放安装，三相电容器内部多接成星形，用三个出线瓷瓶。西欧一些生产厂家电容器内部每个元件上都接有熔丝，而美国、日本等生产厂家则不主张装内熔丝，但国外全膜高压电容器普遍都装有内放电阻器。

元件出线方式大致分两大类。一类是隐箔式，用引线片（一对或多对）引出，元件之间以及组间用联线卡机械夹紧，不采用锡焊，以免焊接温度过高烧伤元件（使薄膜软化或熔化）。另一种办法是露箔式，铝箔电极延伸到元件端，用锡锌焊料先搪在延伸的铝箔极板上，然后再用锡焊料焊接连接线。

另外不少厂家全膜电容器采用 500~550 mm 宽的膜卷制成大元件，一个元件就有 20 kvar 左右，元件数少，装配方便，可节工省时，但对卷制机要求高，要做到元件平整，无皱纹比较困难。以 ABB 为代表的西欧一些生产厂家，主张高压并联电容器也尽可能装元件熔丝，同时采用较小的元件。

为了保证电力电容器运行可靠性，日新公司在电容器上安装了能反映内部压力变化的接头，以监测产品的运行状况。

ABB 公司开发生产的高压电力电容器，采用全膜介质，铝箔延伸，折边，内熔丝；液体介质采用 Faradlol600 浸渍液。它是一种苯基甲苯的混合物，不含任何 PCB，并且是可生物降解的。额定容量在 400~500 kvar 之间，特殊用途可达单台额定容量 500~600 kvar。

Cooper 公司 90 年代开发了一种 EX-7L 型电容器，电容器元件的极板铝箔一边延伸到介质之外，而缩放在里面的那一个边缘是采用激光技术切割的，这样就减小了铝箔边缘的电场强度并且明显地提高了电容器的性能。二个元件之间采用机械方法夹接，这样，其载流能力超过现有的常规电容器。这些技术的综合使用，使得 EX-7L 型电容器比现有种类的电容器效能更高，更加具有可靠性和安全性。激光切割铝箔还使电容器在整个温度范围内的过电压特性有相当大的改进。同样，机械式夹接延伸铝箔结构的低电阻极大地改进了电力电容器的安全特性和使用灵活性。

3 工艺

铝箔折边 为了改善高压并联电容器电极边缘的电场分布，大幅度地提高工作电场强度，国外进行了大量的试验研究。美国西屋公司对浸不同浸渍剂的铝箔折边和不折边的模型电容器进行了大量的试验研究。目前全膜电容器采用较多的有两种：一种是日本一些公司采用的，是一张铝箔二边折边，另一张铝箔不折边，折边铝箔的宽度小于另一张不折边的铝箔的宽度；另一种是美国和欧洲等一些公司采用的，是二张铝箔都折一条边，不折边的铝箔端分别向一边突出。

引线问题 一般采用二种方法：第一种是压接，已被普遍采用，其中压接工具是关键，必须能保证接触良好；第二种是在引线连接处套上一个薄板制成的套，然后用点焊机焊接。法国阿尔斯通电力电容器厂就采用这种办法。

箱壳成形 国外较大外壳多采用折板机折成，由两只 L 形外壳零件焊成壳体，这样弯角的半径很小而且尺寸很准确，有利于提高焊接质量。英国 BICC 公司也采用外壳一次成形设备，这种设备的结构能确保四个弯角半径小而准确，工作较方便，一个工人操作两台机床。法国 AL 和 DOMINITT 使用冲床冲压成形外壳，这样外壳尺寸的准确度就得到了进一

步提高。

外壳试漏 在外壳内部充压缩空气然后观察压力表指针在持续一段时间后的变化，并仔细观察检查焊接部位的渗漏情况。

外壳清洗 有的工厂采用三氯乙烯清洗剂，不锈钢外壳采用这种清洗剂的效果很好，但要求清洗设备结构合理，确保三氯乙烯气体不外溢。

电容器试漏 在真空处理前，有三种办法：一是水中试漏，试验时间较长，观察要很仔细，美国西屋公司和 Cooper 公司都采用这种方法；二是真空试漏，几台产品横放在滚轴运输带上，连接到一个管子上抽真空试漏，法国阿尔斯通公司采用此法；第三种是单台大容量产品用气压试漏，加拿大通用电气公司采用此法。夹渣通常是渗漏油的主要隐患，为了增加表面对底漆的附着力，而更重要的是清除若干夹渣，美国一家工厂在产品真空浸渍完后用喷砂处理产品表面。

绝缘油处理 C101 混合油可采用普通白土吸附。白土用量为油重量的 0.3%~3%。由于它的粘度低，因而可以在室温下进行精制处理。处理时应加入适量的抗氧化剂和稳定剂。除严格控制绝缘的耐压、介损外，许多厂家还对微量水分、绝缘电阻和添加剂含量进行测定和控制。

真空浸渍 国外全膜电容器的真空干燥浸渍处理的时间，一般总周期为 3 至 5 天。日新电机公司对于电容器是否干燥完成，是以由相同时间内的真空度降低程度来判断的，否则真空周期要延长，直到在相同时间内的真空度下降极少才算电容器真空干燥完成。真空度约为 1.3 Pa。绝缘油中的水分含量达到不超过 5 ppm。

浸渍温度应控制在 40~50℃ 为宜。欧洲有些厂家取消了纸包封件，代之以含水率极低的塑料包封件，大大降低了电容器心子的含水量。

4 试验

现行 IEC 标准规定的耐久性试验的方法大致是：电容器在温度类别下限（如 -40℃）放一个晚上，第二天取出置于室温下，施加 1.1 倍额定电压，并每隔 1.5~2 min 加一次 $2.25U_n$ 15 个周波的过电压，每天进行 130~170 次过电压，再放回低温恒温箱中。第二天继续，直到总共受到过电压 1700 次为止。然后在外壳温度 35~40℃ 下，对电容器施加 $1.4U_n$ 至少 500 h，如果电容器没有击穿，即认为通过了该试验。

法国电力公司 (EDF) 在 1993 年向 IEC 提出了一种电力电容器的耐久性试验方法的建议，其主导思想是：耐久性试验要验证介质的缓慢老化不致造成过早的介质损坏，重复的过电压作用不致造成介质击穿。加速寿命试验时电容器的外施电压为 $1.4U_n$ ，介质的内部最热温度达到 75℃，在 3000 h 之内元件击穿不得超过规定值，之后，打开箱盖并对所有元件进行直流击穿电压试验，试验结果应满足 $X-2\delta$ 大于 U_c 。式中 X 为元件击穿电压的算术平均值， δ 为元件击穿电压的标准偏差， U_c 为 2.8 倍的元件额定电压。EDF 与 IEC 的试验方法有一个相似之处，是二种方法都由低温过电压试验和过负荷试验组成。不同的是 EDF 法中规定低温过电压试验和过负荷试验不在同一台试品上进行，而 IEC 法则规定上述二项试验必须在同一台试品上进行，而且两项试验间隔时间不得超过 1 h。

5 保护

ABB 采用的接线和保护有以下几种: 单星形连接的电容器组采用中性点对地零序电压保护, 开口三角形零序电压保护, 差动(桥式差流)保护; 中性点接地单星形连接的电容器组采用中性点对地零序电流保护; 双星形连接的电容器组采用中性点不平衡电流保护, 此时, 两臂容量可以不相等, 这对电容器组的容量组合方便。ABB 认为, 内外熔丝保护方式截然不同, 内熔丝电容器不能再装外部熔断器, 否则是危险的。

ABB 公司在电容器内部保护设计中, 采用每个元件都串联一内熔丝的方法。如果某一元件发生故障即刻被切断, 电容器的输出功率只有微小的减少。

法国 MG 主要生产内熔丝电容器, 其结构型式以横放居多(双套管或单套管), 采用横放式电容器组成的多层布置电容器组, 台架高度相应降低了。MG 三层布置的台架总高 3 m, ABB 单台 416 kvar 三层布置电容器组总高 3.2 m, 这样值班员巡视时就容易看清上层电容器运行情况了。ABB 还加强引线和套管绝缘, 采用便携式 CB10 型电容电桥, 这种电桥可以不拆电容器组连接线查找故障电容器。MG 1983 年开始生产双面粗化膜全膜电容器, 单台容量通常分为 50, 100, 150, 200, 250 和 300 kvar 等 6 级, 也有其他中间容量。MG 6.6 kV 以下生产三相式电容器, 6.6~21.8 kV 及以上电压等级的电容器组采用单相电容器进行组合。生产各种容量组合的户内、户外成套装置, 通常台数较少时(12 台以下)采用立放式电容器单层布置。24 kV 以下电容器组(15~60 台)采用横放式双套管电容器三层布置, 台架不绝缘。超过 24 kV 时用绝缘台架。24 kV 以下有一种封闭柜式成套装置, 配套设备如接地刀闸、阻尼电抗、放电 PT 和开关(负荷开关或接触式断路器)全装在封闭的柜中, 有户内和户外安装两种型式。

MG 电容器组接线方式有三角形、单星形和双星形三种。MG 认为用内熔丝作为内部元件故障保护, 在技术经济方面均可获得最佳效果, 应优先选用; 外熔断器采用喷逐式, 但很少选用。并强调电容器组必须有防止短路和内部过负荷保护; 在几种保护方式中用得较多的是双星形差流保护。

在国外, 除英国矿物油电容器, 比利时氯化联苯电容器曾经内外熔丝同时用过, 其余国家均只用一种熔丝保护或不用熔丝保护而采用继电保护。

6 技术要点

国外认为, 高压全膜电容器制造技术的要点是实现全膜电容器的完全浸渍和在整个生产过程中保持高度的洁净, 特别是 PP 膜、浸渍剂、各种零部件、元件卷制、压装、引线等环境的洁净, 以及操作人员的素质。

表 2-2 列出国外大容量并联电容器主要技术性能对比。

表 2-2 国外大容量并联电抗器主要技术性能对比表

制造厂商	电抗器 型 号	额定电压 (kV)	定容量 (kvar)	额定频 率 (Hz)	相 数	适用 场所	C101+FXE	固体 介质	重量 (kg)	比 特 性 (kg·kvar)	内放 电 阻	内熔丝	外壳 材料	安装 方式	套管数	工作场强 (kV/mm)	外壳尺寸 (L×W×Hmm)	备 注
美国 Cooper	EX-1	7.2	200	60	单	户外	C101+FXE	全膜	30.4	0.153	有	无	不锈钢	卧式	双	56	343×102×521	1980 年产品
美国 Cooper	EX-1	7.2	400	60	单	户外	C101+FXE	全膜	47.7	0.12	有	无	不锈钢	卧式	双	60	343×145×597	1980 年产品
美国 Cooper	EX-7L	6.64	500	60	单	户外	-	全膜	35.7	0.085	有	无	不锈钢	卧式	双	60	343×146×597	1980 年产品
美国西屋	—	6.35	250	50	单	户内	MTB	全膜	38.7	0.194	有	无	不锈钢	立式	双	50	343×122×600	1987 年产品
美国西屋	—	35	300	60	单	户内	MTB	全膜	54.9	0.103	有	无	-	立式	双	-	343×187×570	80 年代中期产品
瑞典ABB	—	19.5	239	50	单	户外	C101	全膜	57	0.23	有	有	不锈钢	卧式	单	51	343×138×020	1987 年产品
瑞典ABB	CR132	6.567	346	50	单	户外	C101	全膜	60	0.197	有	有	不锈钢	卧式	双	51	343×178×750	1980 年产品
芬兰 WKK	POLP	5.95	365	-	单	户外	C101	全膜	53	0.161	有	有	-	卧式	单	-	350×145×020	80 年代中期产品
芬兰 WKK	POLP	5.95	340	50	单	户外	C101	全膜	53	0.156	有	有	-	卧式	单	-	350×145×120	80 年代中期产品
日本日新	FX-GK	19	334	50	单	户外	FXE	膜纸	94	0.201	有	无	-	立式	单	37.5	650×175×640	80 年代小型产品
日本日新	FX-GK	6.35	334	50	单	户外	FXE	膜纸	95	0.204	有	无	-	立式	单	34.3	550×180×665	80 年代中期产品
日本日新	FE-GK	10.5	334	50	单	户外	FXE	膜纸	70	0.21	有	无	-	立式	单	-	—	80 年代中期产品
日本Nitech	AGVAR	6.6	334	50	单	户外	FXE	全膜	94	0.23	有	有	不锈钢	卧式	2	-	630×155×045	80 年代中期产品
德国 ERO	phafo	7.3	292.1	50	单	户外	C101	全膜	60	0.2	有	有	不锈钢	卧式	双	53	345×135×910	1984 年产品
德国 ERO	phafo	7.125	332.7	50	单	户外	C101	全膜	63	0.189	有	有	不锈钢	卧式	双	57	345×135×950	1984 年产品
德国西门子	4RR1240— 2EZ 10ZA14	1.971	244	50	单	户内	C101	全膜	52	0.21	有	有	不锈钢	立式	4	55	345×135×750	电力机车用, 80 年代
意大利SALDO	—	13.9	309	250	单	户内	Baylectrol 4900	全膜	-	-	有	无	不锈钢	卧式	双	-	343×190×750	80 年代末期产品
意大利SALDO	—	13.5	299	350	单	户内	Baylectrol 4900	全膜	-	-	有	无	不锈钢	卧式	双	-	343×190×750	80 年代末期产品
奥地利Kapsch	—	10.5/ √3	300	50	单	户内	C101	全膜	64	0.213	有	无	不锈钢	卧式	4	-	—	80 年代末期产品

