



高压并联电容器 运行及维护技术

张利生 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM531.4

1

高压并联电容器 运行及维护技术

张利生 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书全面、详尽地对高压并联电容器进行了介绍,并力求结合当前国内高压并联电容器运行实际及存在的问题,对高压并联电容器运行和维护技术进行详细介绍。全书共分7章,分别是:并联电容器原理及构造;高压并联电容器组设计;高压并联电容器的运行;高压并联电容器的维护检修;高压并联电容器组配套设备;并联电容器组保护;并联电容器组的操作过电压。

本书适合于供电企业变电技术人员阅读,也可供各工矿企业从事变电运行的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压并联电容器运行及维护技术/张利生编. —北京:中国电力出版社,2006
ISBN 7-5083-4189-9

I. 高... II. 张... III. 高压电容器:移相电容器-基本知识 IV. TM531.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第021523号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年5月第一版 2006年5月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 5.5印张 120千字

印数0001 3000册 定价11.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

在电力系统中，为降低电网电能传输过程中的损耗，提高电网运行的经济性，电网中大量的负荷需要进行容性无功功率就地补偿，实现无功就地平衡。电网中输电线路、变压器等设备也存在无功功率损耗，这就需要在变电所安装无功功率补偿设备，以维持电力系统无功功率的平衡。另外，无功功率、电压调整同频率调整具有同等的重要性。电力系统无功功率的平衡与电压有着密切关系，若系统无功功率电源充足，可调容量大，则可在较高电压水平上保持平衡。如果系统无功功率补偿不足，可调容量少，则当负荷的无功功率需求增加时，只能在较低的电压水平上保持平衡。为了维持电压在规定的范围内运行，必须采取无功功率补偿措施，即设置除发电机以外的其他无功功率电源。尽管无功功率电源的种类较多，但目前国内用得较普遍的是并联电容器，它可根据需要由若干电容器串联、并联组成，容量可大可小，既可以集中使用，又可以分散使用，且可分相补偿，随时投、切部分或全部电容器。它具有运行灵活，有功功率损耗小，维护方便，投资少等优点。因此，在电网建设中应用非常广泛。随着我国电网的发展，以及国家建设节约型社会基本国策的确立，我国电网无功功率补偿水平将会进一步提高。

在电力系统及用户变电所中，由于负荷的自然变化，并联电容器成为投切最频繁的电气设备。由于产品制造原因或设计、运行、维护不当造成严重的并联电容器损坏事故，会给电网带来巨大损失。一些地区，由于电容器爆炸起火，将厂房烧毁，大量设备损坏，造成变电所全停。因此，为了预防这类恶性事故，除了提高产品质量外，还应合理进行电容器的设计选型、安装、试

验，完善电容器的保护措施，以及使从事电容器运行和管理的技术人员了解并掌握并联电容器基本原理及运行维护相关技术，做好电容器的运行管理工作。

编者曾长期在电网企业从事无功功率、电压专业管理工作，在工作中深感生产一线需要一本全面介绍高压并联电容器及最新应用技术的专业书籍，以便掌握并联电容器的运行特点、规律，提高并联电容器的可用率，更好地发挥电容器在电网中的无功功率调节能力，延长其使用寿命，提高产品的使用价值。特编写此书，希望能对读者有所裨益。书中若有错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

2006 年 1 月

目 录

前 言

第一章	并联电容器原理及构造	1
第一节	电容器的发展概况	1
第二节	高压并联电容器的种类	4
第三节	电容器的基本原理	11
第四节	电容器的电场能	13
第五节	电力电容器的绝缘介质	15
第六节	电力电容器的结构	23

第二章	高压并联电容器组设计	33
第一节	并联电容器装置的设计	33
第二节	并联电容器额定电压的选择	40
第三节	集合式并联电容器	44
第四节	并联电容器装置质量控制	51

第三章	高压并联电容器的运行	53
第一节	新安装电容器装置设备验收	53
第二节	并联电容器的运行管理	57
第三节	运行电压异常对电容器的影响	65
第四节	电容器投入时的涌流	66
第五节	电容器运行中的过负荷能力	68
第六节	谐波对电容器的影响	69

第四章	高压并联电容器的维护检修	75
第一节	电容器的日常维护及安装	75
第二节	电容器的检修	78
第三节	并联电容器的老化与寿命	83
第四节	并联电容器的试验	92
第五章	高压并联电容器组配套设备	99
第一节	真空断路器	99
第二节	串联电抗器	107
第三节	氧化锌避雷器	111
第四节	熔断器及熔丝保护	117
第五节	放电线圈	126
第六章	并联电容器组保护	128
第一节	电容器组故障类型及保护配置	128
第二节	电容器组中性点不平衡保护	129
第三节	电容器组的电压保护	132
第四节	电容器组的其他保护	135
第五节	集合式并联电容器内部故障特点 及保护方式	137
第七章	并联电容器组的操作过电压	145
第一节	电容器合闸过电压	146
第二节	电容器分闸过电压	148
第三节	电容器操作过电压的抑制	152
附录	并联电容器部分产品目录	159
参考文献		168



第一章 并联电容器原理及构造

第一节 电容器的发展概况

电力网中并联电容器的应用极为广泛,以并联电容器补偿电网的无功功率是无功功率补偿的主要形式。无功功率补偿设备一般包括并联电容器、串联电容器、同步调相机、无功功率静止补偿器等。以并联电容补偿形式来提高电网的功率因数,力求实现无功功率就地平衡,降低线损,提高电压质量,是世界各国电网技术发展的趋势。

在交流电的使用中,人们发现了功率因数的问题,即 $P = UI\cos\varphi$ 。为使 $\cos\varphi=1$,需要在交流系统中增加并联电容器。世界上最早用来改善功率因数的并联电容器,是由波兰人莫舍克设计并在瑞士的波尔城电容器厂生产出来的。它是一种类似莱顿瓶的电容器,可以做到 10kV 电压等级,极间介质采用玻璃,但因性能不好,故生产的时间不长。第一次世界大战期间,美国首先开发了纸介质电容器,当时极间固体介质用的是普通纸,浸渍剂是石蜡和油,其制造工艺差。19 世纪 30 年代以后,电容器介质材料有所改进,生产工艺也得到提高。当氯化联苯介质问世后,由于其化学性能稳定,电气性能优越,耐高温、不易燃等优点,很快在世界范围的电容器制造业中被广泛采用。30 年代~60 年代相继生产了使用五氯联苯、三氯联苯作浸渍剂的纸电容器。氯化联苯介质对世界电容器制造业的生产和发展起到了很大的推动作用,也使电容器技术及应用得到极大提高。但由于氯化联苯有毒,对环境的污染问题没能解决,世界上大部分国家对其进行限制或禁止。目前,由于性能十分先进的合成液体的发展及应用,

在电容器制造领域氯化联苯介质已被合成油所彻底取代。塑料膜用于电容器已有很久的历史，1940 年德国开始采用聚苯乙烯膜生产电容器。之后，美国、意大利等国家也相继生产，但聚苯乙烯膜缺点是耐高温性能差，电容器温度不能超过 55℃。为改善上述性能，研制了聚苯乙烯膜与纸复合的电容器，其技术性能远好于纯纸产品。特别是 20 世纪 60 年代中期等规双轴定向聚丙烯膜的研制成功，使膜纸复合介质的并联电容器得到了快速的发展。这种膜其分子结构合理，能耐高温 90℃。70 年代中期以后，国外采用纯聚丙烯膜介质（即全膜介质）已成为主要的发展趋势。

我国电力电容器制造业紧跟国外先进技术的发展趋势，成功地推动了产品的技术进步，实现了由全纸介质、膜纸复合介质向全膜介质的转化，产品技术经济指标大幅提高，并开发了许多适应我国国情和有利于环境保护的新品种，产品质量明显提高，基本上满足了国内电力工业快速发展的需要。目前国内生产的并联电容器类型为：低压自愈式并联电容器、单元式高压并联电容器、集合式高压并联电容器、干式高压自愈式并联电容器（1997 年由桂林电容器厂推出）、无散热措施的 SF₆ 气体绝缘集合式高压并联电容器（西安电容器厂推出）、有金属导热板的 SF₆ 气体绝缘集合式高压并联电容器（2002 年无锡电容器厂推出）、采用散热管的气体绝缘集合式高压并联电容器（2002 年由山西星河电气公司与桂林电容器厂推出）。生产的并联电容器组电压等级为 220V、10kV、35kV、66kV。

我国电力电容器制造业是从 20 世纪 50 年代开始的，已经有 50 多年的历史。从 20 世纪 80 年代开始，电容器制造厂通过消化吸收引进技术，在制造技术、产品质量和运行技术上都有了快速发展，从根本上改变了国产电容器的技术状况，扭转了从国外大量进口电容器的局面。从产品运行可靠性来讲，国产电容器与进口产品相比并不逊色，有的还优于进口产品，使国产电容器在我国电力建设中发挥着重要作用。但是，国产电容器与国外先进

水平相比，在体积、质量、耗材等经济指标和外观上还有较大差距，原材料如薄膜性能有待提高，尤其是在静止型动态无功功率补偿和串联补偿装置等高新技术方面还落后许多。

新一代电容器的主要特征是采用新的先进结构设计，即电容器单元选用了优质易浸渍的双面粗化聚丙烯薄膜作固体介质和性能优异的合成液体电介质浸渍剂如苺基甲苯（法国 c101）作液体介质，并应用铝箔凸出电极钎焊新工艺淘汰了传统的插入引线片的电极引出方式，使并联电容器的技术性能和经济指标得到极大提高，目前这种全膜结构的电容器在国内外是最先进的。该全膜电容器损耗低，是全纸电容器的 1/10，局放性能好，在 1.2 倍额定电压下保证局放熄灭。对于产品性能的提高，以量大面广的壳式电容器为例，将 20 世纪 90 年代中期的主导产品 BFF 型膜纸复合电容器与现今的 BAM 型全膜电容器的技术经济性能进行对比，对比情况见表 1-1。

从表 1-1 可以看出，现在生产的电容器单台容量有了大幅提高，介质损耗降低到原来的 1/4 以下，单位千乏的质量和体积降为原来的 2/3 以下，合资公司的产品容量和场强为上限，比特性为下限。新产品大都采用新型结构的内熔丝，可按用户要求采用不锈钢外壳，外壳绝缘水平和爬电比距也都有了等级上的提高。

表 1-1 **膜纸复合电容器与全膜电容器的**
技术经济性能进行对比表

型 号	容 量 (kvar/台)	比特性 (kg/kvar)	场 强 (MV/m)	介 损 ($\tan\delta$)
膜纸复合 BFF 型 (二苺基乙烷)	334	0.35	38	8×10^{-4}
全膜 BAM 型 (苺基甲苯)	334~500	0.15~0.23	53~60	2×10^{-4}

制造工艺的进步保证了产品质量的提高，现在国内西安、桂林、无锡、锦州的四大高压电容器制造企业都先后进口了国际上

最先进的电容器元件全自动卷制机和全自动真空浸渍设备,焊接、油漆设备和工艺也有了很大改进,在关键工艺设备上已经或正在更新换代。由于制造工艺的进步,有力地保证了产品质量的稳定提高。

✱ 第二节 高压并联电容器的种类 ✱

为满足电力系统及广大企业用户的需要,我国电力电容器行业通过吸收国外先进技术及自主创新,开发并生产了多种新型高压电容器,用于无功功率补偿和交直流滤波。高压电容器的新品种有额定电压为 6.6~66kV 的集合式并联电容器、额定电压为 6.6~35kV 的充气集合式并联电容器、额定电压 6.6~10kV 的自愈式高压并联电容器、额定电压为 35kV 的静补装置 (SVC) 和额定电压 220~500kV 的 HVDC 用交流高压电容器。

一、壳式单元电容器

国产壳式高压并联电容器的单台容量较小。从 20 世纪 80 年代末期至今,国产大容量电容器仍然是以单台 334kvar 的为主导,近几年出现了 440kvar 的电容器,西安 ABB 合资公司的产品单台容量达到 823kvar。而国外瑞典、美国 GE 公司、美国 COOPER 公司等从 1998 年就已开始批量提供单台 1000kvar 的电容器了。

二、集合式高压并联电容器

集合式高压并联电容器于 1985 年在我国开发成功,90 年代逐步在电力系统推广应用,目前应用已非常广泛,约占高压并联电容器的 1/3。集合式高压并联电容器具有容量大、占地面积小、安装维护方便的特点,同时外壳接地,对人安全、引出套管少、耐污秽、防鸟害的问题容易解决等优点,因此,在国内得到了广泛的应用。目前,集合式并联电容器的制造电压等级最高到 66kV,单台容量高达 10000kvar 以上。国际上,日本日新公司是集合式并联电容器的创始厂,也是唯一生产厂,但目前已停止

生产该产品。国内陕西合阳电容器厂开发这种产品之初是从日本坦克式电容器得到启发。但国内制造的集合式高压并联电容器有自己独创之处，与日本电容器相比，有两点显著不同：一是日本电容器内部是大元件的组合体，而我国集合式并联电容器却是带小铁壳的电容器单元组合体；二是日本电容器内部元件不用内熔丝，而集合式并联电容器单元内的元件却均串有内熔丝。这两个不同成功地结合了中国国情，降低了生产的难度，提高了运行可靠性。迄今为止，我国是世界上唯一的集合式并联电容器生产和使用国。然而，集合式并联电容器因单台容量大、不可拆分、难于检测、缺乏经验等也给大量使用带来了隐患。

三、充气集合式并联电容器

充气集合式是在充油集合式并联电容器基础上，从2000年开始发展起来的新品种。用微正压（通常表压0.04 MPa）的 SF_6 气体或 SF_6 与 N_2 的混合气体取代可燃的绝缘油，充入集合式电容器的大箱体内。这种新产品除具有上述充油集合式电容器的优点外，还具有难燃、防爆、不会漏油污染的优点，以及不必在变电所增设储油坑和防火墙等附加设施。与自愈式高压电容器相比，具有寿命长、价格低的优点。由于适应了城市变电所设备无油化的要求，这种新产品一问世，市场发展就很快，有广阔的发展前景。

充气集合式并联电容器需要解决三个问题：散热、密封、绝缘。散热方面通过内装热管散热器解决；密封方面，瓷套与盖间采用专业化材料及结构设计，盖与外壳及其部件间采用电焊，充气阀门为单向、双重；绝缘方面，采用将单元瓷套加高等。保护方面，继电保护与充油产品一样，此外还有过压力保护、单元立放、内熔丝。充气集合式并联电容器允许的气压范围为 $0 \sim 0.06 \text{ MPa}$ ；年漏气率在 $\leq 0.5\%$ ；单元内部最热点温度 $(1.2U_n) \leq 75^\circ\text{C}$ 。

四、自愈式高压并联电容器

随着城市建筑向高层和地下迅速发展，用户对输变电装置的

安全性要求越来越高,使用难燃型或不燃型设备已经成为电力行业的新趋势。开发研制难燃型或不燃型电力电容器已成为当今世界许多制造厂家的重要工作之一。目前,高压领域干式并联电容器的进展相对滞后。日本与美国 GE 公司先后研制了充气型密封结构的干式高压并联电容器。日本于 20 世纪 80 年代末期已有产品供应,价格是全膜电容器的几倍。美国 GE 公司因成本太高而放弃了推广使用。我国桂林电力电容器厂于 1998 年在原自愈式低压并联电容器技术基础上开发了高压干式电容器,由于能满足城市变电所设备无油化的迫切要求,对城网用户有很大吸引力。但在投入运行后频繁发生着火故障,影响了其推广应用。无油自愈式电容器可以通过本身的自愈性能隔离击穿点,使电容器继续运行。这时,健全元件将出现过电压,运行工况劣化,一定程度后,元件加速老化,故障面迅速扩大。当自愈失效后,残存电阻不是零,而是欧姆级与兆欧级之间的某个值。一旦处于欧姆级时,该元件的温度就会升高,温度升高到一定程度,金属化膜的介电强度就会大幅度下降,严重时会引起元件爆裂着火。因此,应当实施完善的内部故障保护。之后,厂家对自愈式高压并联电容器设计技术进行了完善和改进并提高元件保护的灵敏和可靠性,因而第三代积木式自愈式高压并联电容器已具有灵敏和可靠的元件保护,着火故障问题已基本解决。但目前自愈式高压并联电容器使用中仍存在的问题是,电容器散热问题和使用寿命偏短的问题,自愈式高压并联电容器设计的正常寿命最多为 7 年。

五、静止型动态无功功率补偿装置 (SVC)

无功补偿技术的发展,经历了电容器、调相机后,由于同步调相机响应速度慢,噪声大,损耗大,技术陈旧等目前基本已不再使用;而开关投切电容器因属于慢响应补偿方式,连续可控性差等,不能满足各种情况的需要;晶闸管控制电抗器 (TCR) 型和晶闸管投切电容器 (TSC) 型静止无功补偿装置 (SVC) 因先进的控制技术,正得到越来越广泛的应用。

静止无功功率补偿装置是相对于调相机而言的一种利用电容

器和各种类型的电抗器组成的无功功率补偿（提供可变动的容性和感性无功功率）装置。它利用先进的技术，不依靠断路器或其他有触点开关，能平滑控制动态的无功功率。由于相控阀技术的成熟和散热方式的改进，设备价格大幅下降，达到用户能够接受的水平，因此该装置近几年发展很快，已在冶金企业广泛采用，用户切实感受到了其在功率因数动态补偿、抑制闪变和稳定供电电压方面带来的好处，并产生了巨大的经济效益。目前，国内电力系统为提高电网运行的暂态稳定水平，在电网 220kV 枢纽变电所逐步增加 SVC 装置。

常规 SVC 的典型配置见图 1-1。TSC（Thyristor Controlled Reactor）控制见图 1-2。TCR（Thyristor Switched Capacitor）控制见图 1-3。

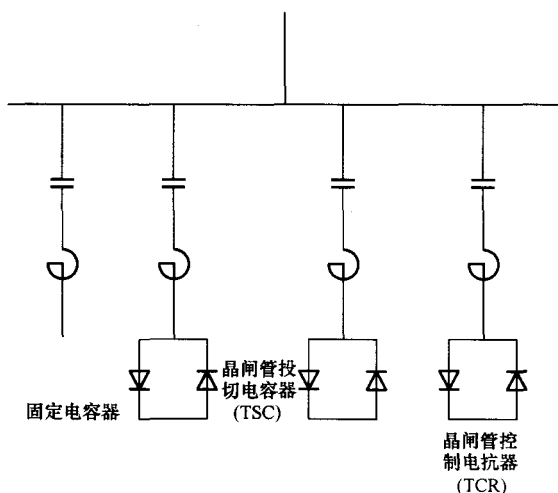


图 1-1 常规 SVC 的典型配置

全世界已有超过 600 套、总容量约 40Gvar 的 SVC 在工业部门使用（见图 1-4）。目前，全世界已有超过 400 套、总容量约 60Gvar 的 SVC 在输配电系统运行。如图 1-5 所示为英国国家电

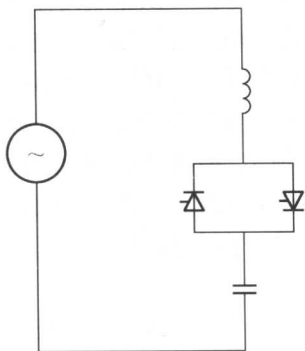


图 1-2 TSC 控制

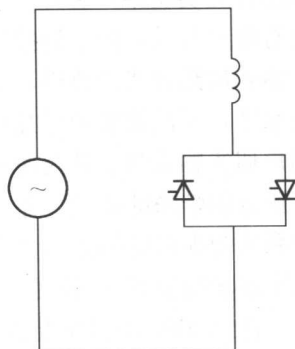


图 1-3 TCR 控制

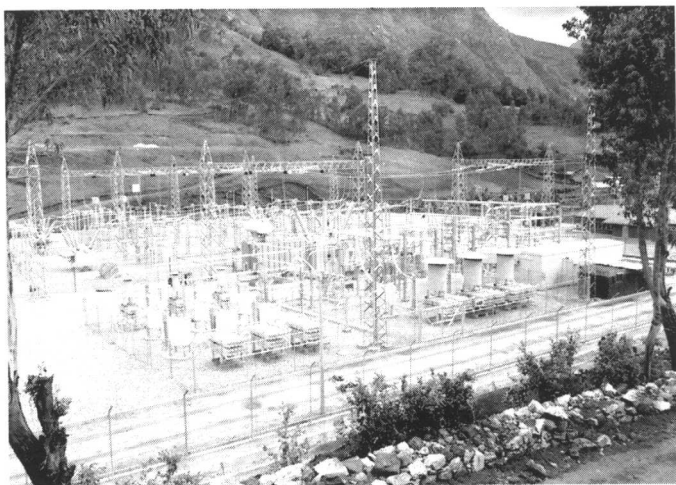


图 1-4 SVC 在矿山工业用户中的应用

网 Cellarhead 400kV 变电站，电压比为 400/8kV，接入 8kV 母线，补偿容量为 $-75 \sim +150\text{Mvar}$ ，由 $2 \times 65\text{Mvar}$ TSC、 95Mvar TCR 和 20Mvar FC 组成。我国输电系统有 6 套、容量为 $105 \sim 170\text{Mvar}$ 的 SVC 安装在 5 个 500kV 变电所，均为进口。

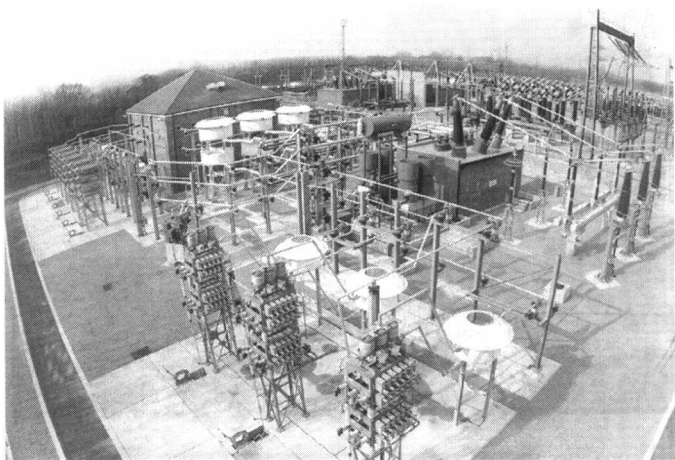


图 1-5 英国国家电网 Cellarhead 400kV 变电站 SVC 装置视图

配电工业用户有 100 套以上，约 1/5 为进口。鞍山 220kV 红一变电站为国家电网公司 2003 年重点科技示范工程（见图 1-6~图 1-8），容量为 100Mvar，于 2004 年 9 月 13 日顺利投运，是国内首座具有完全自主知识产权的 SVC 国产化示范工程。今后，由于 SVC 对提高超高压电网电压稳定性，特别是重要负荷中心的电压稳定性起重要作用，有助于提高有功功率输送能力。由于常规电容补偿装置不能适应突增负荷需要和全国大型互联网中动态

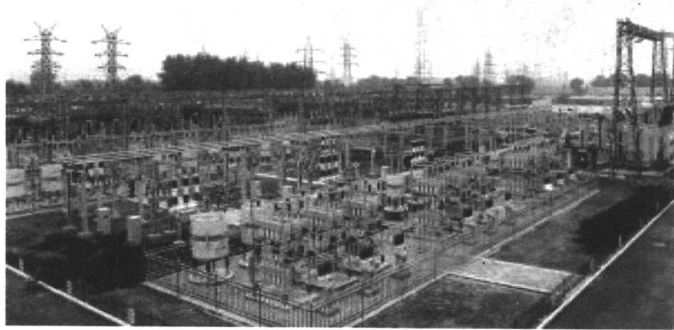


图 1-6 220kV 鞍山红一变电站 SVC 装置视图



图 1-7 220kV 鞍山红一变电站 SVC 装置视图

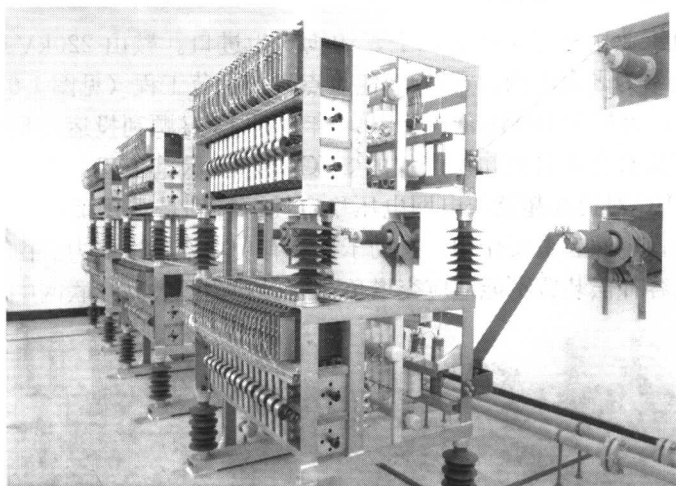


图 1-8 变电所 SVC 装置晶闸管阀视图

无功功率储备的需要，我国电网对大容量 SVC 的需求将逐步增加。

在我国超高压输电网中，目前规划的动态无功功率补偿工程