

新型可控饱和电抗器 理论及应用

陈柏超 著

武汉水利电力大学出版社

· 武汉 ·

前 言

新型可控饱和电抗器 (简称可控电抗器) 是电力系统中电压控制和无功补偿的重要装置, 近年来受到了广泛重视并得到初步应用。与现有无源及有源静止型动态无功补偿装置相比, 可控电抗器具有适用电压范围宽广、可靠性高、谐波小、占地面积省、维护简单等显著优点, 是一种经济、高性能的静止型动态无功 (感性) 补偿装置。

可控电抗器的应用前景十分广阔, 涉及到高压和超高压电网电压、无功潮流控制; 改善系统稳定性和增加传输功率; 超高压电网工频和操作过电压限制; 单相接地电流补偿 (消弧); 大功率整流系统的谐波抑制等。

本书内容反映了作者在攻读博士和做博士后研究期间在可控电抗器理论和应用研究方面所取得的最新成果。全书内容分为三部分, 第一部分为绪论和第一章, 简要叙述可控电抗器的发展历史和电力系统过电压及电压调节问题; 第二部分包括第二章至第七章, 对磁阀式和裂芯式可控电抗器进行了理论分析; 第三部分由第八章至第十三章构成, 介绍了可控电抗器在电力系统中的部分应用情况。

作者特别感谢武汉水利电力大学博士生导师陈维贤教

授对所从事研究工作的精心指导和帮助,并在百忙中审阅了本书。博士生尹忠东、刘虹参与了部分研究和实验工作,作者对他们表示感谢。研究工作还得到了华中电力集团公司、有关变压器厂等许多单位和同志的热情支持。如湖北省电力局、河南省电力局、铁道部郑州铁路局、武汉长江变压器厂和河北保定变压器厂(天威集团)等。谨此向他们表示深切的谢忱。

由于作者水平有限,书中一定存在不少缺点和错误,希望读者批评指正。

陈柏超

1999年9月 于珞珈山

目 录

绪论	1
第一章 电力系统中的过电压及电压调节	9
第一节 超高压长线操作过电压及限制方法	9
第二节 超高压长线的电容效应	11
第三节 电力系统中的电压调节	15
第二章 含可控电抗器长线暂态过程的高阶算法	23
第一节 引言	23
第二节 磁化曲线的数学模型	24
第三节 三相输电线的 π 形电路模型	29
第四节 基于长线贝杰龙模型的状态变量法	33
第三章 可控电抗器工作原理及所产生的谐波	41
第一节 引言	41
第二节 可控电抗器的工作原理	41
第三节 可控电抗器所产生的谐波	45
第四节 国家谐波标准	54
第五节 谐波抑制方法	55
第四章 磁阀式可控电抗器的数学模型及特性	70
第一节 磁阀式可控电抗器的数学模型及计算	70
第二节 磁阀式可控电抗器特性分析	94
第三节 磁阀式可控电抗器动态特性分析	107

第五章 磁阀式可控电抗器简化模型和漏电抗	111
第一节 可控电抗器的基本结构形式	111
第二节 基本工作状态	112
第三节 可控电抗器漏电抗及简化电路	114
第六章 可控电抗器暂态过程及参数	123
第一节 假定条件	123
第二节 可控电抗器漏抗及基本方程	124
第三节 电磁暂态过程及参数计算	127
第七章 裂芯式可控电抗器的数学模型及特性分析	141
第一节 裂芯式可控电抗器基本物理过程及特性	141
第二节 裂芯式可控电抗器容量计算及伏安特性	150
第三节 三相可控电抗器的数学模型	156
第八章 可控电抗器限制操作过电压	162
第一节 可控电抗器限压机理	162
第二节 可控电抗器限制三相对称合闸过电压	170
第三节 可控电抗器限压特性分析	180
第九章 可控电抗器接入长线的非对称运行	195
第一节 引言	195
第二节 带可控电抗器运行方式下感应电压的特性	195
第三节 实验研究	206
第十章 配网自动调谐消弧线圈及控制	210
第一节 引言	210
第二节 谐振接地电网及运行	211

第三节	可调消弧线圈结构原理	213
第四节	消弧线圈特性	214
第五节	参数自动测量和控制原理	215
第六节	现场试验及分析	219
第十一章	磁阀式可控电抗器调压控制系统	224
第一节	控制模式及特性	224
第二节	触发控制系统	228
第三节	磁阀式可控电抗器调压控制系统模拟实验	235
第十二章	电气化铁道动态无功补偿系统	243
第一节	引言	243
第二节	电气化铁道供电系统	243
第三节	牵引供电系统电流分析及功率因数	245
第四节	动态无功补偿装置原理	248
第五节	可控电抗器结构及电磁方程	248
第六节	谐波特性	252
第七节	分段式并联磁阀结构	253
第八节	可控电抗器实验结果	254
第十三章	提高可控电抗器响应速度的措施	255
第一节	增加直流控制电压	255
第二节	利用充电电容放电提高响应速度	257
第三节	直流预偏磁提高响应速度	259
参考文献		266

绪 论

电网中的无功平衡对提高全网经济效益和改善供电质量至关重要。根据电力工业的现状和发展,新型无功补偿装置的研制和应用是我国当前电力系统需要着重解决的重大关键技术课题^[1]。

目前,无功补偿的主要装置是同步补偿机和静补设备,它们的价格昂贵且维护复杂。在超高压长线中,单向供电会因电容效应而产生不能容许的工频电压升高和相应的暂态振荡过电压^[2]。接在变压器低压或中压绕组上的上述补偿设备,由于线路一侧的开关分闸而被同时切除,起不到限制工频过电压的作用,故我国目前普遍采用了超高压并联电抗器,它直接接在长线中而不因开关的操作退出运行和丧失补偿功能。

并联电抗器的结构十分复杂,价格要比同级功率的电力变压器高得多,其容量不能做成连续可调。我们知道,超高压线路的最大传输功率通常接近于线路的自然功率 P_N 。当传输小功率时(例如在水电站的枯水季节),并联电抗器起到充分补偿线路容性无功的作用。然而,当传输功率接近于 P_N 时,线路中的容性和感性无功恰好自我补偿,并联电抗器就将成为多余的装置,它不仅使得线路电压过分降低,且其无功电流会在电网中造成附加的有功损耗,也就降低了全网的经济效率。这样一来,在传输大功率时,超高压并联电抗器应从线路上加以切除。然而,如在此时发生线路的故障切除和重合,并在此过程中造成短时间的单向供电方式,那么空载线路会因失去补偿而产生不能容许的工频和操作过电压^[2]。这是常规电抗器的固有缺点。为了解决这一矛盾,原苏联采用并联电抗器带火花间隙的投入方式^[3]。但后者的结构显得十分复杂,工作很不可靠,收不到理想的效果。原因是火花间

隙的动作值受外界因素的影响颇大，动作的可靠性低。动作后因为间隙的热容量不够，还需另设能够快速和可靠投入的旁路高压开关，投资较大。欧美一些厂家曾试用过此种方案，但由于上述原因不再向这方面发展。至于我国，则不得不将电抗器长期地投入运行。显然，这并非是一种理想的解决方案。

可以设想，如果有一种特殊的超高压并联电抗器，它不仅能随着传输功率的变化而自动平滑地调节本身的容量，而且当并联电抗器在小容量的范围运行时（线路传输大功率），一旦发生暂态过程，它会急剧地增大容量而呈现出深度的强补效应，即仍能起到像大容量那样的降低操作过电压的作用，这就在很大程度上提高了电网的运行效益。近期的研究工作表明，新型可控电抗器能够满足上述要求而显示其巨大的技术优越性。

对可控电抗器认真的理论研究和实践探索还是近十年才开始的（主要在原苏联）^[4]。文献[4]中介绍了可控电抗器若干种可能的结构型式。数值计算表明，在瞬间过电压作用下，某些型式可控电抗器的强补倍数（相当于补偿度）达数十倍以上，而且能够持续几十个工频周期，这就使得长线中的强制（工频）电压分量在此持续时间内降低到极低数值，操作过电压也就被大幅度地抑制下来。研究表明，在超高压长线中，可控电抗器可轻易地将操作过电压限至 2 倍以下，因而可以取代现有的常规限压措施。对于特高压电网，要求将操作过电压限至 1.6 倍以下，上述常规措施难以凑效，而可控电抗器则可满足这一要求。

对于 6 kV~220 kV 的电网，系统用户的负载通常为感性，一般采用固定电容器组进行就地集中或分散补偿，以提高功率因数，降低损耗。当负载运行处于低谷时期，若不切除电容器组，剩余的容性无功会在线路中流动，造成电压波动和损耗增加。可控电抗器容量的平滑调节能大大改进无功补偿系统，从而减少电网损耗和提高供电质量，为社会带来巨大的经济效益。

现有的无源无功补偿装置大体可分为两类：

(1) 无功静态补偿装置：其中包括为提高用户功率因数而使用的电容器组以及为吸收超高压输电线路充电和轻负荷时的过剩无功以降低工频过电压幅值而采用的并联电抗器等。

(2) 动态无功补偿装置：其中包括可灵活调节无功输出的同步补偿机（调相机）以及近十多年来出现的静止型动态无功补偿装置（SVC）。

电力系统的无功补偿设备选型不但与具体的补偿要求有关，而且与电源布局、网络结构以及电器制造水平有密切关系，在电网发展的不同阶段有不同的选择。

在电网发展初期或长距离输电中使用调相机较多，因为调相机在系统电压下降时具有快速的过载能力，而开关投切的电容器、电抗器组不但没有过载能力，其容量反而随电压下降成平方关系降低。尽管调相机有上述优点，但因有其它缺点，一些发达国家总的趋势是不再积极发展调相机。在无功补偿设备构成中，开关投切电容器、电抗器组的比重占绝对优势。以日本为例，从1959年起便不再新装调相机，无功补偿设备主要是电容器。1967年调相机容量占无功补偿设备容量的比例为7.5%，到1982年调相机的比例下降为1.1%。调相机逐渐被开关投切的电容器、电抗器组所取代。在日本，静止动态无功补偿装置主要用于冲击负荷。法国自1961年以后没有新增调相机，无功补偿主要是电容器。到80年代初，调相机占无功补偿容量的比例为8.1%。

在我国，80年代前许多远离负荷中心的水电站相继投运。220 kV网处在发展阶段。为提高水电站的传输能力，支持受端电压，在中间或受端变电站大多选用调相机，或者在丰水期将受端汽轮发电机组改作调相运行。在无功补偿设备构成中，1979年调相机容量的比重为22%，电容器为78%；到1988年调相机比重下降到10%，电容器上升为88.5%，静止动态补偿器的比重不到2%。

综上所述，在调相机被逐步淘汰的同时，具有技术优越性的

静止型动态无功补偿装置 (SVC) 并没有得到广泛的应用。主要原因之一就是其价格昂贵。因此, 对于我国乃至国外未来的电力系统而言, 无功补偿设备的选型问题主要是一个技术经济问题^[5]。

借助直流控制的磁饱和型可控电抗器 (简称可控电抗器) 在国际、国内都没有得到足够的重视 (除俄罗斯) 和推广应用。其制造工艺简单、成本低廉, 研究表明^[6, 7, 8, 9] 对于提高电网的输电能力、调节电网电压、补偿无功功率以及限制操作过电压, 该类可控电抗器都具有无以伦比的应用潜力。

可控电抗器是借助控制回路直流控制电流的激磁改变铁心的磁饱和度 (即工作点), 从而达到平滑调节无功输出的目的。可控电抗器是在磁放大器的基础上发展起来的。早在 1916 年就由美国的 E. F. W. 亚历山德逊提出了“磁放大器”的报告^[10]。到了 40 年代, 随着高磁感应强度及低损耗的晶粒取向硅钢带和高磁导、高矩形系数的坡莫合金材料的出现, 将饱和电抗器的理论与应用提高到一个新水平。1955 年美国的 H. F. 斯托姆著了《磁放大器》一书, 1956 年苏联 M. A. 罗津布拉特也著了《磁放大器》一书, 标志着磁放大器发展的高峰, 当时已成为自动化系统不可缺少的基础元件。与此同时, 科技工作者把磁放大器的工作原理引入到电力系统中的自动无功控制。1955 年世界上第一台可控电抗器在英国制造成功^[11], 其额定容量为 100 MVA, 工作电压为 6.6kV ~ 22 kV。该可控电抗器主绕组为 2 组, 均为之字形连接。这样, 对应相的两个基波电流在相位上相差 30°, 并且由于有三角形绕组, 3 倍频及 7 次以下的奇次谐波自我抵消而不注入电网。据当时的测量, 电流谐波含量不超过 1.5% 的额定电流, 直流绕组损耗不超过 0.25% 的电抗器额定容量, 主绕组损耗则不超过 0.8%。该可控电抗器有一个很大的缺点, 控制直流的改变会导致接成三角形线圈内部电流的变化, 过渡过程时间取决于三角形线圈的时间常数, 其值一般很大, 故该装置调节速度很慢。另一个特点就是较大的有效材料消耗 (3 kg/kVA) 以及相对大的有功损耗 (1%)。而一般

不可控铁芯电抗器的有效材料消耗及有功损耗分别为 0.8 kg/kVA 和 0.5%。我国的武汉钢铁公司曾于 80 年代引进过一套可控电抗器型动态无功补偿装置,用于轧钢系统的自动无功补偿。运行结果表明效果十分良好^[12]。70 年代以来,由于可控硅器件迅速发展及相控电抗器的出现,可控电抗器被打入“冷宫”。随着电力工业的飞速发展,人们生活水平的普遍提高,超高压、特高压电网相继投入运行,对供电质量及可靠性的要求越来越高。因此产生了一系列的新问题:超高压大电网的形成及负荷变化加剧,要求大量可调的无功功率源以调整电压,维持系统无功潮流平衡,减少损耗,提高供电可靠性^[13]。70 年代发展起来的相控电抗器 (TCR) 高昂的造价决定了其在电力系统广泛应用的不合理性。鉴于上述原因,电力专家们转而寻求更加经济和可靠的可调无功补偿装置。

1986 年,原苏联学者 A. M. Бранцев 提出了可控电抗器的一种新型结构^[16],从而使可控电抗器的发展有了突破性进展。新型可控电抗器可直接用于直到 1150 kV 的任何电压等级的电网作为连续可调的无功补偿装置,因而可直接接于超高压线路侧(开关在内),同时发挥同步补偿机和并联电抗器的作用。

可控电抗器在电力系统中的应用前景和潜力是十分广阔和巨大的。下面列出其可能的应用范围和功能。

(1) 在超高压电网中作调相调压设备

可控电抗器由于可做成任何电压等级,直接并入超高压电网,因此具有显著的技术、经济性。在超高压电网的枢纽站和大型终端站,为了补偿地区所需无功以调整电压和维持系统稳定,传统上考虑装设一定容量的同步补偿机或 SVC 装置。目前,我国电网缺少的调相容量相当大,今后在更多地区兴建坑口电站和大型水电站(例如举世瞩目的三峡水电站)以后,为了改善系统的稳定性能和减少输电损耗,有功电源侧一般很少送出无功,使得受端所需无功必须自我补偿,所以调相容量将更为缺乏。因此可控电抗器将为我国今后解决这个矛盾提供一个理想的途径。

(2) 在远距离输电系统中的应用

① 抑制系统过电压

远距离输电线路轻载时，由于法兰梯效应会在线路末端产生电压升高现象。假如送端系统较弱，则送端电压也会有所升高。由于超高压系统的绝缘水平只有少量裕度，所以此种稳态工频过电压就成了安全运行的严重威胁。以往是靠装设固定联接的并联电抗器来吸收过剩无功，以抑制工频过电压。可是固接的大容量并联电抗器带来了以下不利影响：(a) 增大等效波阻抗^[13]，减少自然功率值和线路传输能力；(b) 在重载输电时，仍需给电抗器提供大量无功，这就要求受端系统增大容性补偿无功和相应投资；(c) 因电抗器有持续的有功损耗而增大输电成本。可控电抗器能直接接在超高压线路侧（开关在内），同时发挥同步补偿机和并联电抗器的作用。

可控电抗器除了可限制上述工频过电压外，还能大幅度地限制因线路开关操作而产生的操作过电压，从而可望取代现有的限压装置（如合闸并联电阻等）。

② 提高系统稳定性，增大输电能力

可控电抗器可用以保持母线电压。由于它有快速的动态响应能力（调节时间小于0.3 s），可以在系统受到某种大的干扰（发生短路事故、切机、拉开线路、投入重载线路等）时，自动保持甚至提高端点电压，这就大大有利于系统的稳定运行。

③ 抑制系统功率振荡

在系统间的联络线路上，当地区系统出现短路、切机、拉开重要线路等重大干扰时，往往产生按系统自然频率波动的功率振荡。因为大系统的阻尼相当弱，所以一旦出现振荡后便难以抑制。为了避免此种危害，一般被迫减少联络线的传输功率。可控电抗器由于能快速补偿无功、稳定电压，因此它是抑制系统功率振荡的有效设备。

(3) 在直流输电系统中的应用

高压直流输电往往需要解决如下几个重要问题:①补偿无功:整流站及送变站各需提供直流输送功率的 50% ~ 60% 的补偿无功;②调整电压;③抑制过电压,降低绝缘要求。可控电抗器配合电容器组可解决上述问题。

(4) 在有冲击负荷的电力用户和变电站的应用

① 抑制电压闪变

电气机车、电弧炉、大型轧钢机、加速器等都属于大功率无功冲击负荷。其特点是变动周期短,变化速度快。通常用具有快速调节能力的静止补偿器 (TCR) 进行补偿,抑制电压闪变,改善电压质量。由于无功冲击负荷的补偿要求快速的补偿装置,因此,常规的可控电抗器达不到要求。近期的研究表明^[14],可控电抗器的调节时间可以大大缩短到一个工频周期以内,从而为可控电抗器在抑制电压闪变方面的应用打下良好的基础。图 1 为著作者所研制的 27.5 kV, 2 400 kVA 单相可控电抗器工业样机,已用于电气化铁路系统的动态无功补偿器 (介绍见第十二章)。

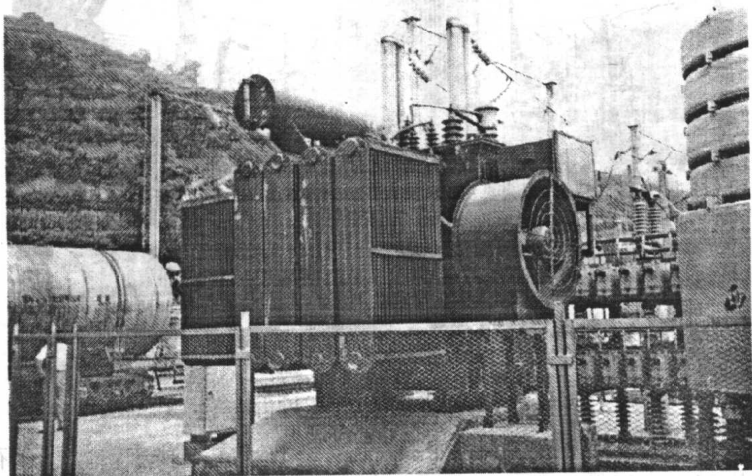


图 1 运行中的 27.5 kV, 2 400 kVA 可控电抗器样机

② 补偿用户无功，提高功率因数

可控电抗器配合电容器组可以大大提高用电企业的功率因数，从而用户交纳电费可免受罚，甚至转为受奖。

③ 平衡负载

可控电抗器可用来消除负荷的不平衡运行给电网带来的影响，从而使不平衡负荷处的供电电压平衡化。

(5) 在谐振接地配电网中的应用

应用可控电抗器原理制作的可调消弧线圈具有可靠性高、响应速度快、谐波小等一系列优点，可快速准确补偿单相接地电流，提高供电可靠性。图 2 为正在运行中的 35 kV，550 kVA 全自动调谐消弧线圈。

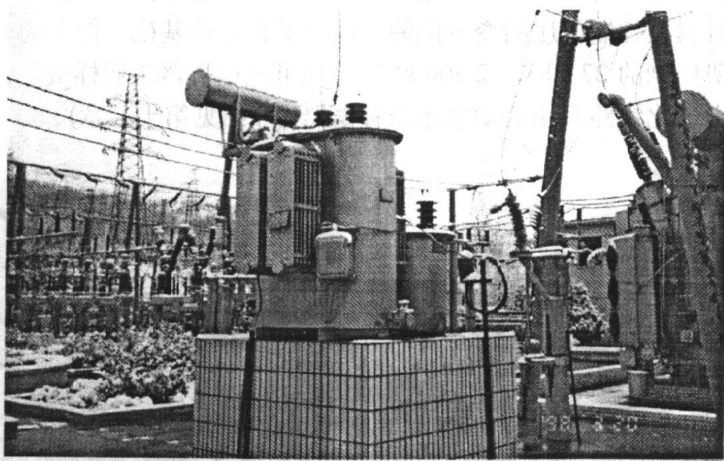


图 2 运行中的自动调谐消弧线圈

(6) 提高三相整流电路功率因数及抑制谐波

单相可控电抗器接入三相整流电路的零序回路中，根据负荷变化而自动调节，可使系统功率因数接近 1.0，高次谐波分量大大减小。

第一章 电力系统中的过电压及电压调节

第一节 超高压长线操作过电压及限制方法

超高压电力系统运行的可靠性在极大程度上取决于绝缘的工作状态。系统运行时，除额定工作电压外，绝缘还受到雷过电压以及因系统故障和断路器操作所产生的高幅值操作过电压的作用^[2]。对于 220 kV 及以下系统，根据设备绝缘结构设计，允许承受可能出现的 3 倍操作过电压，因此不必采取专门的限压措施。330 kV 及以上超高压、特高压系统的绝缘费用对整个电网的造价有显著的影响。出于这一考虑，必须采取措施将操作过电压限制在较低水平。根据过电压保护规程，对操作过电压倍数做出如下规定^[15]（相对地绝缘）：

330 kV 2.75 P.U

500 kV 2.20 P.U

特高压电网要求将操作过电压限制到更低的水平。

作用于超高压及特高压系统中的操作过电压主要有以下三类：

- (1) 合闸、重合闸过电压
- (2) 空载线路分闸过电压
- (3) 电网故障解列、振荡解列过电压

我国超高压电网将主要采用仿法 FA4-550 型 SF₆ 断路器^[16]。运行经验表明，该断路器可以保证在开断空载线路时不发生重燃。因此上述第二类过电压对线路绝缘不起控制作用。

电网故障解列、振荡解列过电压与电网结构、运行方式以及参数等有关。在建网初期，线路送、受端联系薄弱，如果线路发生非对称永久性接地故障或某种原因导致电网振荡造成送、受端

电源电势功角差摆加大而解列时，将发生较高过电压^[17]。根据对某些电网的观测研究，这类过电压在严重条件下可达 3.0 倍。但这种过电压出现机会甚少，即使在极其罕见的解列过电压下出现线路绝缘闪络的情况，一般不会给已受到扰乱的电网带来实质性的附加损失^[18]。因此，在线路绝缘设计中没有必要考虑这类过电压。

显然，超高压电网绝缘配合中起控制条件的操作过电压乃是上述第一类型的操作过电压。对于计划性合闸，过电压系数最大可达 2.0 倍，而三相自动重合闸，特别是不成功的三相重合闸，过电压最为严重。这主要是由于不对称效应使健全相残压高于相电压、空载长线路的电容效应以及相间电磁耦合等原因所致。目前，我国超高压系统中只采用单相自动重合闸，这就可以排除单相接地时健全相的工频电压升高问题^[19]。由于故障相被切除后，线路上无残余电荷，加上零序回路的阻尼作用大于正序回路，因此单相重合闸过电压低于正常合闸过电压。表 1-1 中引用国内一部分 500 kV 线路合闸、重合闸过电压的试验及计算结果^[20]。可见，线路末端的合闸，重合闸过电压倍数大多会超过 2 倍，甚至达 2.5 倍。

表 1-1 线路合闸、重合闸过电压

编号	线路长度 (km)	并联电抗器容 量 (MVAR)	计划合闸		单相重合闸		三相重合闸	
			首	末	首	末	首	末
1	374	2 × 180	1.92	2.85	1.82	2.58	2.75	2.82
2	370	2 × 150	2.32	2.63	1.84	1.99	—	—
3	314	2 × 150	1.80	2.23	1.66	2.35	—	—
4	290	2 × 150	2.30	2.57	1.76	2.01	1.67	3.10
5	260	2 × 150	—	—	1.41	1.91	—	—
6	135	0	2.54	2.74	2.21	2.39	—	2.87

具有优良性能的 ZnO 避雷器已能将超高压和特高压线路中的操作过电压限至在额定相电压两倍以上。例如俄罗斯 550 kV 线路只用 ZnO 避雷器一种限压措施。我国的 ZnO 避雷器实际上也达到类似的水平。然而，即便如此，我国和其它一些国家仍然同时利用断路器并联电阻来限制合闸过电压，这可提高限压的可靠性和减轻避雷器的工作负担。近年来，有人提出取消断路器合闸并联电阻，仅靠金属氧化物避雷器限制合闸和重合闸过电压的设想^[21, 22]。由于 550 kV 断路器合闸并联电阻的价格较贵（GIS 中的更贵），因此，这种想法颇具吸引力。但也有人从确保 550 kV 系统安全运行的角度出发对此持审慎的否定态度^[23]。无论是哪种方法的讨论，都围绕着限压的可靠性和经济性这两个中心来进行。据不完全统计，1986 年~1987 年，机械委、水电部对国产 FA4-550 断路器的运行质量所作的抽查表明，一些运行单位的断路器并联电阻存在着接触时间过长和拒动现象。此后，虽对该产品作了结构上的改进，但我国超高压输变电运行专业情报网 1989 年发表的统计资料认为，500 kV SF6 断路器（包括国产和进口的）在运行中暴露出漏气和液压机构失压等缺陷。而国内已运行的 ZnO 避雷器（无论是国产的还是进口的）事故率都比较高。至 1991 年初为止，我国 110 kV ~ 500 kV 系统中运行的 ZnO 避雷器，损坏、爆炸的共约 60 余相。有一相进口的 500 kV ZnO 避雷器在运行电压下发生严重爆炸；预防性试验中发现不合格退出运行的也约有 60 余相，其中进口的 20 余相，国产的 40 余相。显而易见，探索更为有效、可靠和经济的限压措施仍是颇具实用意义的研究课题。我们在以后的有关内容中将研究一种新型方法，即用可控电抗器限制合闸操作过电压问题。

第二节 超高压长线的电容效应

长线中的操作过电压是在工频电压升高的基础上振荡产生的。