

# 电压无功控制 及优化技术

■ 姜宁 赵剑锋 王春宁 徐春社 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 电压无功控制 及优化技术

---

姜宁 赵剑锋 王春宁 徐春社 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

无功电源同有功电源一样,是保证电能质量的不可缺少的一个重要组成部分。采用优化的无功补偿方案,可以使配电系统保持最优的无功平衡,把输配电功率损失降低到最低水平。同时,随着现代电力电子的大量应用,提高电能质量、降低电压或电流的幅值、频率、波形等参量与标准规定值的偏差,提高电力系统的运行效率、实现电压和无功技术、装置与管理的优化已得到了高度的重视和关注。

本书共分5章,分别为电压和无功概述、电压稳定和无功潮流、电压稳定的实时监控技术、无功控制技术、电压无功优化控制实例分析。

本书适用于从事电网无功优化技术的生产技术以及管理人员使用,同时供大中专学校相关专业的师生学习参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电压无功控制及优化技术/姜宁等编. —北京:中国电力出版社,2010.1

ISBN 978-7-5083-9880-8

I. ①电… II. ①姜… III. ①电力系统—系统电压调整②电力系统—无功功率 IV. ①TM761

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第229302号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2011年10月第一版 2011年10月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 15.625印张 266千字

印数 0001—3000册 定价 38.00元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 前 言

电压无功控制及优化技术是建设坚强智能电网、提高电能效率、保障电力供应、提高服务质量的重要内容之一。

当前，提高电能质量、提高供电可靠性和挖掘电网潜能是全社会都十分关注的热点，电力技术发展和资源高效利用的一个重要内容就是向电力用户提供可靠、优质的电力服务。更是电力企业提升服务水平、提高企业竞争能力的重要手段。

现代社会的发展对电力供应的要求越来越高，电力能源也日显缺乏，科学采取电网电压无功控制及优化技术正是解决问题的关键所在，这是基于电网电压质量的好坏直接干扰着电网的稳定及电力设备的安全运行，而无功功率的高低对于电压的质量和电网的损耗起着很大的影响。同时，传统的电压无功手动调节方式已越来越不适应电力系统发展的需要，电压无功自动控制的优化技术已成为改善电能质量、降低电网损耗、减轻运行人员劳动强度的必不可少的手段。

电压无功控制及优化技术主要是通过调度自动化系统采集各节点遥测、遥信等实时数据，以各节点电压合格、关口功率因数为约束条件，进行在线电压无功优化分析与控制，实现主变压器分接开关调节次数最少和电容器投切最合理、电压合格率最高以及输电网损率最小的综合优化目标，最终形成控制指令，并通过调度自动化系统自动执行，实现电压无功优化运行闭环控制。

为适应电力发展和当前建设坚强智能电网的需求，普及电压无功控制与优化的知识和应用技术，我们特组织编写本书。在编写过程中，我们结合自身的实际工作体会和经验总结，同时查阅了大量的相关资料和文献，参考了众多有关专家及专业工作者提供的现场案例、技术经验，以及公开发表的文章、正式出版的书籍和非正式出版的有关资料，并引用了有关同志的研究成果和试验数据，特别是收集了某些地区值得借鉴的典型案例和治理措施，在此一并表示衷心的感谢。

由于水平、能力和知识面所限，不妥和错误之处恳请批评指正，不胜感谢。

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 电压和无功概述</b> .....	<b>1</b>
1.1 电压和无功技术现状与发展 .....	1
1.2 电压的基本概念 .....	15
1.3 无功的基本概念 .....	23
1.4 电压无功控制 .....	48
<b>第 2 章 电压稳定和无功潮流</b> .....	<b>85</b>
2.1 电压调整的方式 .....	85
2.2 电压调整的措施 .....	99
2.3 无功功率平衡 .....	103
2.4 电压稳定 .....	109
<b>第 3 章 电压稳定的实时监控技术</b> .....	<b>117</b>
3.1 电压监测 .....	117
3.2 电压控制模式和特点 .....	118
3.3 电压稳定的分析方法 .....	124
3.4 电压稳定的控制装置的设计 .....	134
<b>第 4 章 无功控制技术</b> .....	<b>145</b>
4.1 无功电源的优化及配置 .....	146
4.2 无功优化算法 .....	154
4.3 输电网无功优化的技术 .....	162
4.4 配网及线路的无功控制 .....	187

<b>第 5 章 电压无功优化控制实例分析 .....</b>	<b>200</b>
5.1 分布式实时电压无功优化控制 .....	200
5.2 基于多代理技术的电压无功控制 .....	209
5.3 风电场的无功电压控制 .....	219
<b>参考文献 .....</b>	<b>243</b>



## 电压和无功概述

### 1.1 电压和无功技术现状与发展

近年来,随着电力技术的科技进步尤其是信息技术的飞速发展,基于计算机、微处理器控制的用电设备和电力电子设备在电力系统中得到大量应用,对电能质量的要求越来越高,对电力系统的干扰更加敏感,往往由于电能质量的影响造成设备故障或停运,甚至影响电力系统的安全运行。以电气化铁路机车牵引式负荷为例,由于是整流负荷,属于典型的谐波源;由于采用工频单相交流供电,属于典型的负序源;由于负荷的波动和不确定性,又属于典型的电压波动和闪变源,从而在运行中造成对系统电能质量的污染和影响。因此,提高电能质量,降低电压或电流的幅值、频率、波形等参量与标准规定值的偏差,提高电力系统的运行效率、实现电压和无功技术、装置与管理的优化已得到了高度的重视和关注。

目前,对电力系统电压和无功问题的影响主要表现在以下几个方面:

其一,电力系统负荷侧对电能质量的污染呈增长趋势。过去电能质量问题主要源于系统侧,如电力设备及装置的正常使用和自动保护,大型电力设备的启动和停运、自动开关的跳闸及重合,自然现象的因素,雷击、风暴、雨雪等影响。而近年来,用户端大量非线性负荷的应用正成为电能质量恶化的重要因素。如从低压小容量家用电器到高压大容量的工业交直流变换装置中存在的各种静止变流器,它是以开关方式工作的,会引起电网电流、电压波形的畸变。大型电弧式设备,如电弧熔炉,弧焊设备等,也成为重要的冲击源和谐波源。一个值得注意的问题是为了减少重要设备对电能质量问题的敏感度,设备制造商努力进行设备的升级和改进,用户则采用各种保护性装置,而这些改进措施和保护装置常常顾此失彼,对公共供电的电能质量造成更大的危害。

无论是大容量的电力负荷,还是基于电子技术的民用负荷,都有可能引起

电压波动和闪变、产生高次谐波、造成三相电压不平衡，从而使电能质量受到污染，如大型电弧炉及焊机单相负荷的应用等都会造成三相电压不平衡，引起电压正弦波畸变并产生电压波动与电压闪变。而电压下跌、电压上升、尖峰脉冲和瞬时断电等动态电能质量影响，尽管对普通的用电负荷影响不大，但对于敏感与严格的用电负荷将产生很大的危害，如对微电子控制的自动化生产流水线、计算机控制的生产流程系统及 IT 行业等，将可能危及设备的安全与稳定运行，甚至造成大量产品报废，如某半导体芯片生产企业就报道过因电压下跌引起生产周期内的芯片全部报废的事故，造成了重大的经济损失。

电能质量污染不仅影响到电力系统的正常运行，而且影响到电力用户、通信设备及其他相关行业的安全运行和正常生产。如某地区 110kV 变电站 10kV 母线上的电容器多次发生原因不明的过电流保护动作，电容器开关跳闸，甚至还发生了 10kV I、II 段母线上的两台电容器同时跳闸的特例，经检查电容器和过流保护装置均正常，通过分析监测确认跳闸原因是由于谐波干扰引起的事故。又如，某钢厂发生过因电弧炉产生谐波的影响，造成谐波电流对数字型差动保护装置干扰，使差动保护动作跳闸而引起全厂停电的重大事故。因此，认识电能质量污染的危害并采取相应的防范措施和对策，是优质供电服务的一项重要内容。一些用电设备的电流谐波含量如表 1-1 所示。

表 1-1 一些用电设备的电流谐波含量 (%)

设备名称	谐波次数 (次)						
	3	5	7	11	13	2	4
六脉冲整流器	—	17.5	11.1	4.5	2.9	—	—
十二脉冲整流器	—	2.6	1.6	4.5	2.9	—	—
交流电弧炉	16	8	4.5	2.5	1.1	17	6
六相整流供直流电弧炉	—	17.5	11.1	4.5	2.9	—	—
某综合负荷	60.8	33.7	16.9	—	—	1.8	3.0

其二，电压和无功问题的内涵发生了较大改变。交流输电功率包括有功功率和无功功率。在有功功率不变的情况下，无功功率越大就会使功率因数降低，视在功率增大，从而需要增大发、输、配电设备的容量，增加投资和电力损耗费用；使输电线路电压降变大，不利于有功电力的输送与合理应用。如果无功储备不足将会导致电网电压水平降低，冲击性的无功功率负载还会使电压产生剧烈的波动，恶化电网的供电质量。对于给定的有功分布，要想使无功潮流最小以减少系统的损耗，需要对无功功率的流向与转移进行优化控制。因



此,对电网的无功进行就地补偿,尤其是动态补偿,在输配电系统中就显得十分必要。

### 1.1.1 电压无功补偿装置技术与发展

电力系统中,常见的无功控制方法有同步发电机、同步电动机、同步调相机、并联电容器和静止无功补偿装置等,其中静止无功补偿装置由于技术性能优良,目前已逐步进入完善、发展和普及应用阶段。

静止无功补偿技术经历了3代:第1代为机械式投切的无源补偿装置,属于慢速无功补偿装置,在电力系统中应用较早,目前也仍在应用;第2代为晶闸管投切的静止无功补偿器(SVC),属无源、快速动态无功补偿装置,出现于20世纪70年代,国外应用普遍,我国目前有一定应用,主要用于配电系统中,输电网中应用很少;第3代为基于电压源换流器的静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM),亦称ASVG,属快速的动态无功补偿装置,国外从20世纪80年代开始研究,90年代末得到较广泛的应用,我国的STATCOM示范应用工程在河南省。

早期的无功补偿装置主要是无源装置,方法是在系统母线上并联或者在线路中串联一定容量的电容器或者电抗器。这些补偿措施改变了网络参数,特别是改变了波阻抗、电气距离和系统母线上的输入阻抗。无源装置使用机械开关,它不具备快速性、反复性、连续性的特点,因而不能实现短时纠正电压升高或降落的功能。

20世纪70年代以来,以晶闸管控制的电抗器(TCR)、晶闸管投切电容器(TSC)以及二者的混合装置(TCR+TSC)等主要形式组成的静止无功补偿器(SVC)得到快速发展。SVC可以看成是电纳值能调节的无功元件,它依靠电力电子器件开关来实现无功调节。SVC作为系统补偿时可以连续调节并与系统进行无功功率交换,同时还具有较快的响应速度,它能够维持端电压恒定。SVC虽然能对系统无功进行有效的补偿,但是由于换流元件关断不可控,因而容易产生较大的谐波电流,而且其对电网电压波动的调节能力不够理想。随着大功率全控型电力电子器件GTO、IGBT及IGCT的出现,特别是相控技术、脉宽调制技术(PWM)、四象限变流技术的提出使得电力电子逆变技术得到快速发展,以此为基础的无功补偿技术也得以迅速发展。20世纪80年代以来,一种更为先进的静止型无功补偿装置出现了,这就是采用自换相变流电路的无功补偿,被称为静止无功发生器(Static Var Generator, SVG),

或称其为高级静止无功补偿器 (Advanced Static Var Compensator, ASVC), 也称静止调相器 (Static Condenser, STATCON)。SVG 作为 FACTS 家族最重要的成员, 在美国、德国、日本、中国相继得到成功应用。它是以电压逆变技术为基础的无功补偿装置。电压型的 SVG 直流侧采用直流电容为储能元件, 通过逆变器中电子开关的通断而将直流侧电压转换成交流电网同频率的输出电压。当只考虑基波频率时, SVG 可看成是与电网同频率的交流电压源通过电抗器与电网相连接。由于 SVG 的直流电容仅起到电压支撑的作用, 因此其电容量远小于 SVC 中的电容量。同时, SVG 的调节速度更快、调节范围更广、欠压条件下的无功调节能力更强, 既可以发出无功功率、呈电容性, 也可以吸收无功功率、呈电感性, 采用 PWM 控制, 可使其输入电流接近正弦波, 且 SVG 的谐波含量及装置占地面积相对 SVC 都大为降低。但由于价格昂贵, 技术要求高, 国内目前尚未得到普及推广应用。

### 1.1.2 电网动态电压无功补偿技术与发展

我国电网中目前使用最为广泛的补偿装置是机械投切的并联电容器组。为满足调压要求, 在低压供电网络中装设了大量的并联电容器组, 在中压配电网中装设了少量的并联电容器组。自 20 世纪 80 年代以来, 我国对晶闸管控制的 SVC 投入了大量研发力量, 目前已有了一定的技术基础和产品应用。近年来, 动态无功补偿问题已引起了相关方面的高度重视, 但高压大容量产品仍主要依靠进口。

目前, 我国输电系统中有一些大容量 SVC 投入使用, 它们分别被装设在广东江门、湖南云田、湖北凤凰山 (2 套)、河南小刘以及辽宁沙岭的 500kV 变电站中。此类 SVC 多为进口, 其中有 3 套是 ABB 公司的产品。高电压等级下 SVC 面临的最为严重的问题是电容器爆炸, 如广东江门 500kV 变电站中 SVC 运行 5 年后并联电容器爆炸, 湖南云田 500kV 变电站中 SVC 自 1988 年以来发生了 4 次电容器组爆炸事故。

在中低压配电系统中, 近年来主要采用无平滑调节功能的 TSC 实现分级无功补偿。SVC 在大型工矿企业中的应用较为广泛, 在钢铁企业中的应用尤为突出, 南京钢铁公司、张家港沙钢钢铁公司、武汉钢铁公司、包头钢铁公司、宝山钢铁公司、济南钢铁公司、天津钢管公司等均装有该补偿装置。如济南钢铁公司中厚板厂二期工程在 35kV 母线上就安装了由西门子公司设计制造的一套容量为 25Mvar 的 SVC, 2001 年底带负荷一次投运成功。

1999年3月,我国第一台工业化 STATCOM 在河南省洛阳市朝阳变电站成功并网运行,标志着我国掌握了高压大容量 FACTS 设备的设计制造技术。该 STATCOM 基于 GTO 器件,主电路核心部分是电压型多重化逆变器,容量为 $\pm 20\text{Mvar}$ ,由清华大学电机系柔性输配电系统研究所与河南省电力公司联合研制。为了进行机理研究,事先还研制了1台 $300\text{kvar}$ 中间工业试验装置,于1995年8月并网闭环运行。目前,清华大学电机系正和上海市电力公司联合研制基于链式结构的 $\pm 50\text{Mvar}$  STATCOM,它将应用于上海 $500\text{kV}$ 电网中。

从国际范围来讲,目前 SVC 与 STATCOM 都已得到普遍的应用。SVC 出现早,应用时间长,仅 ABB 公司,其目前在全世界投运的 SVC 就已超过 370 套,ABB 与西门子两个公司已安装的 SVC 总容量约为 9 万 Mvar (包括已退役装置)。STATCOM 装置在 20 世纪主要以示范工程为主,从 20 世纪 90 年代末到 21 世纪初,STATCOM 在日本及欧美得到了广泛应用,尤其是在冶金、铁道等需要快速动态无功补偿的场合。目前,随着大容量 STATCOM 的投运,表明 STATCOM 在输电网中已完全进入实用阶段。由于都是基于电压源换流器技术,这些 STATCOM 装置仅通过改变母线接线方式,就可以变成背靠背的直流输电,能对电网的潮流进行更有效的控制。

### 1.1.3 动态无功补偿装置的工作原理及应用

#### 1.1.3.1 SVC 的技术原理及应用

静止无功补偿装置 SVC 是以晶闸管控制的电抗器 TCR、晶闸管投切电容器 TSC 及两者混合装置 TCR+TSC 等主要形式组成,运用电力电子技术实现的无功可调节补偿装置,其重要特性是能比较稳定的保持动态变化负荷的功率因数,同时还具有较快的响应速度以维持端电压的恒定。由于 SVC 具有快速反应的优良技术性能和无功补偿效果,节能效果显著。能够较好解决单相负荷造成的供电网严重三相不平衡及功率因数低、谐波含量高、电压波动与闪变,对供电网干扰、对周边工厂用电设备干扰等问题。因此,SVC 是目前国内推广应用比较普及的动态无功补偿技术,在一些经济发达地区的低压配电系统已逐步占据了静止型无功补偿装置的主导地位。

#### 一、SVC 的技术原理

##### (一) SVC 的结构组成

SVC 通常包括晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电容器 (TSC),以及这两者的混合装置 (TCR+TSC),或者晶闸管控制电抗器与固定电容器

的混合装置 (TCR+FC)，晶闸管控制电抗器与机械投切电容器的混合装置 (TCR+MSC) 等。其中，TCR (Thyristor Controlled Reactor) 是晶闸管投切电抗器型静止无功补偿装置，由于单独的 TCR 只能吸收感性的无功功率，因此往往与并联电容器配合使用，并联电容器后，使得总的无功功率为 TCR 与并联电容器无功功率抵消后的净无功功率，其特点是可以连续调节补偿装置的无功功率，有谐波产生，一般与 TSC 或 FC 滤波器配套使用。TSC (Thyristor Switched Capacitor) 则是晶闸管投切电容器型静止无功补偿装置，电容器的投切开关为晶闸管，其特点是可断续调节补偿装置的无功功率，无谐波产生，可单独使用或与 FC 滤波器配套使用。TCR 与 TSC 型原理图与 SVC 运行时的电流电压特性如图 1-1 所示。

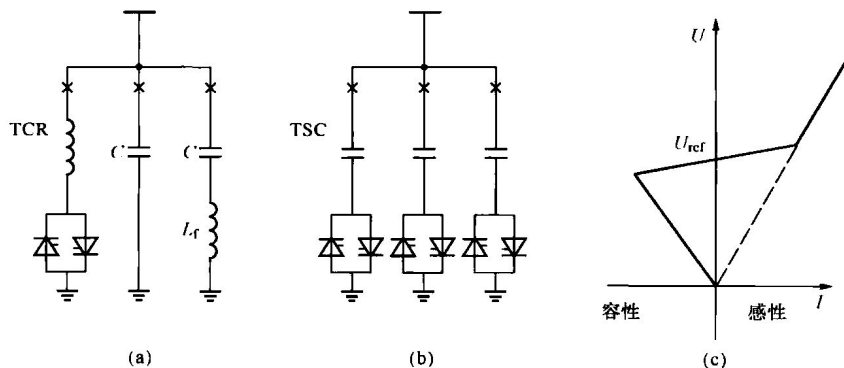


图 1-1 TCR 与 TSC 型原理图与 SVC 运行时电流电压特性

(a) TCR 型原理图；(b) TSC 型原理图；(c) 电流电压特性图

TCR 和 TSC 都可以分相调节，可按每相电压或无功的要求确定。具有在不对称故障时支撑电网电压的作用，使电网不至于因电压崩溃而失步。TCR 和 TSC 形式的静止补偿器可用于对无功进行连续和快速控制的地方，具有很多功能。如改善电压调整、提高静态和动态稳定、降低过电压、降低电压闪烁、阻尼次同步振荡、减少电流和电压的不平衡等。

TCR+TSC 型 SVC 的基本拓扑结构如图 1-2 所示。由 1 台 TCR、2 台 TSC 以及 2 个无源滤波器组成，在实际运用中，TSC 及无源滤波的组数可根据需要设置。

## (二) SVC 的技术原理

SVC 动态无功补偿装置 FC+TCR 的单相电路结构图如图 1-3 (a) 所示，

波形图如图 1-3 (b) 所示。

在 FC+TCR 结构中, 电容器  $C$ 、电感元件  $L$ , 双向导通的晶闸管组 T1 和 T2 组成一个动态的无功补偿系统。其波形图如图 1-3 (b) 所示, 如果晶闸管全导通, 电感支路相当于一个纯电感, 消耗最大无功功率。FC+TCR 补偿系统输出最小无功功率, 此时晶闸管的导通角为零 ( $\alpha=0^\circ$ )。如果增大导通角 (正反相都可以), 电感支路的电流

就减小, 同时电流呈现间断性。如果继续增大导通角, 一直到  $\alpha=90^\circ$ , 此时电感支路为完全断开, 电流为零, 电感支路吸收零无功。FC+TCR 补偿系统输出最大无功功率。所以, FC+TCR 回路的无功输入 (出) 是与电感支路相反的。当电感支路吸收零无功时, 系统输出最大无功功率。而电感支路吸收最大无功功率时, 系统输出最小无功功率。改变晶闸管的导通角就可以连续调节无功功率。晶闸管是依靠电压正向偏置时, 由触发电路强制半导体导通, 而关断则是当只有电流自然过零时, 晶闸管自动关断, 虽然这样的开关动作改变了电流的波形, 见图 1-3 (b), 但其基波分量与晶闸管的导通角有以下的直接关系

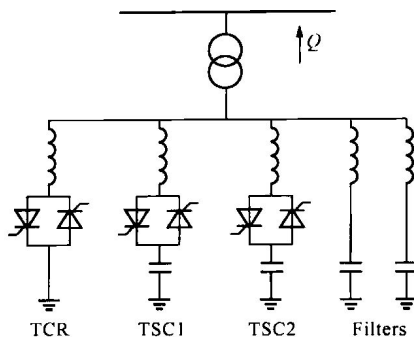


图 1-2 TCR+TSC 型 SVC 的基本拓扑结构

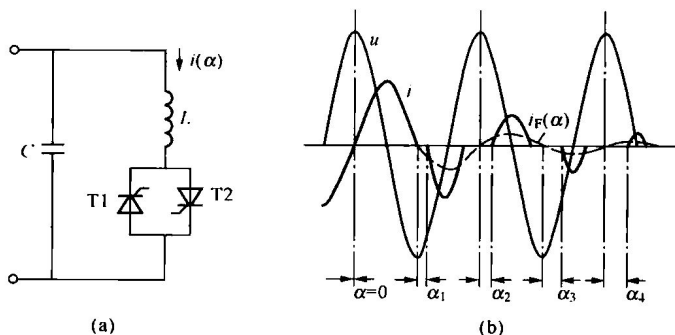


图 1-3 FC+TCR 的单相电路结构图

(a) FC+TCR 结构图; (b) FC+TCR 波形图

$$i_F(\alpha) = \frac{v}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (1-1)$$

式中  $i_F$ ——电流基波分量;

$v$ ——端口电压;

$\omega L$ ——TCR 电抗器的电抗值。

根据式 (1-1)，可以通过控制晶闸管的导通角  $\alpha$ ，达到控制电流的目的。晶闸管是只可以控制导通，不可以控制截止的可控硅功率元件，而导通时只需要很短的脉冲信号，导通后脉冲信号可以去掉，以减少损耗，晶闸管门电路的脉冲控制信号与电流波形的关系如图 1-4 所示。

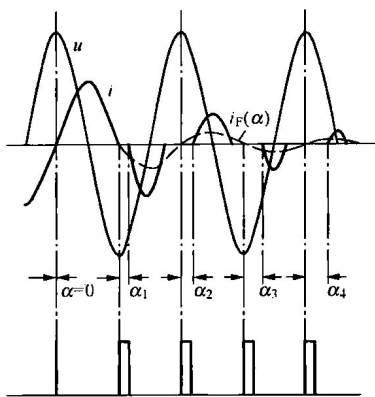


图 1-4 晶闸管门电路的脉冲控制信号与电流波形关系图

晶闸管的控制原理通过图 1-4 可以看出，晶闸管导通角在不断增加，而脉冲信号的宽度不变，就是说导通角是从电压的峰值开始计算的。

## 二、SVC 的应用特性

SVC 运行于电力系统中的特性主要包括以下几方面。

(1) 可增强系统的暂态稳定性。SVC 安装于中长距离输电线路中部可改善系统的暂态稳定性，其  $P-\delta$  特性曲线给故障后电机提供的减速面积和暂态裕量比没有补偿的情况下要大。

(2) 可支撑系统电压、防止电压崩溃。当系统发生故障或无功电流急剧增高的瞬间，可对系统进行瞬时无功补偿，支撑电压以抑制电压崩溃的趋势。

(3) 能有效阻尼系统振荡。TCR 可用极快的速度平滑地调节无功和电压，具有调制状态工作的能力。

(4) 能在与工频 50Hz 不同的频率下作适当浮动。若浮动与系统摇摆或振荡频率相同而相位相反，则可增大系统的阻尼而抑制振荡。

(5) 能补偿不平衡负荷。负荷不平衡时，SVC 不平衡控制策略可补偿系统使供电电流趋于三相平衡，能够使单相负荷变成三相平衡负荷而没有无功分量。同时，还能够抑制负荷侧电压波动和闪变，校正功率因数。

(6) SVC 在配网和工矿企业的应用主要是考虑无功传输对配网电压质量和线损增大的影响。为降低无功传输带来的不利影响，可在配网无功负荷集中处安装一定容量的 SVC，由 SVC 向负荷点就近提供无功功率，减少系统流入的无功功率，这样不仅可使网络产生的压降减小，也可使网络的线损降低。

## 三、SVC 应用中的一些问题

(1) 应用 SVC 进行高压动态无功补偿，需要用电容器提供固定的容性无

功  $Q_c$ ，补偿电抗器通过的电流决定了补偿电抗器输出感性无功的大小，感性无功和容性无功相抵消，才能实现电网功率因数为常数，这就意味着需要两倍的补偿容量进行互相抵消。

(2) 固定电容器、电抗器一直接在电网上，损耗大、噪声高，运行中将产生 30~80W/kvar 的能耗，使运行成本增加。

(3) 由于晶闸管导通时极电压产生的热量需要配置散热器和进行风冷，可能影响运行的可靠性。同时，设备的占地面积较大。

(4) SVC 虽然能对系统无功进行有效的补偿，但 SVC 是通过改变控制角来改变电感中通过的电流，由于换流元件关断不可控，因而容易产生较大的谐波电流，而且其对电网电压波动的调节能力不够理想。

(5) 由于 SVC 进行无功补偿属于阻抗型补偿，随着电压的降低其无功输出也会与电压成平方关系而降低。

(6) 直接用晶闸管进行高压动态补偿，元器件价格高、维护成本高，对系统的保护和散热要求也高。同时，由于  $di/dt$  的限制，不能在 1 个周波实现全部补偿。

#### 四、应用中的一些认识

(1) 10kV 变电站和某些特殊用电单位，如电弧炉钢铁厂等，应推广应用 10kV 动态无功补偿装置。目前，FC+TCR 与 TCS 两种类型的可控硅动态无功补偿装置较为经济实用，与 FC+TCR 不同的是，TCS 只能释放无功功率，不能吸收无功功率，与传统的接触器投切电容器，即电容器静态无功功率补偿器相比，它达到了无冲击投切，这对于很多容易出现谐振的系统尤其重要。FC+TCR 和 TSC 是两种不同的模式，比较而言，TSC 只能分级调容，不能连续调节，且 TSC 装置不能做到分相控制，成本较高。所以建议采用 FC+TCR 型电容—电感型动态无功补偿装置用于 10kV 的动态无功补偿。

(2) 对 FC+TCR 运行中产生谐波的问题，一般可通过将补偿装置以“ $\Delta$ ”方式连接来消除 3 次谐波和所有其他零序谐波分量；并上 5 次、7 次滤波器消除 5 次、7 次谐波。这样通过采取措施，电压、电流谐波一般均能控制在国标规定的电压  $THD$  和电流  $THD$  的限值以内。

(3) 根据客观条件和实际需求可配置低压 SVC 装置。电力系统各级网络和输配电设备都要消耗一定的无功功率，尤以低压配网所占比重最大。为了最大限度地减少无功功率的传输损耗，提高输配电设备的效率，应按照“分级补偿，就地平衡”的原则进行合理布局。无功负荷的最优补偿，是研究无功补偿

的最佳方案。实践证明，功率因数偏低会造成大量有功电能损耗，多消耗无功就会相应地多消耗有功。如不能就地平衡无功，就会使输配电和发电设施不能充分发挥作用，降低发、输电的能力。实践证明，配置低压 SVC 装置可取得非常好的无功补偿和就地平衡效果。

(4) 对负荷变动大的变电站存在的功率因数低、谐波含量高、电压波动与闪变，对供电电网干扰大和对周边工厂用电设备干扰等问题，建议采用 SVC 通过低压侧升压变压器进行补偿的方式，以实现快速动态无功补偿、稳定电压波动、提高电能质量、增强电网带负载的能力；对随电压的降低 SVC 无功输出也与电压成平方关系而降低的情况，建议采用基于电压源逆变器的 STATCOM 技术，以取得更好的效果，促进节能降耗水平的显著提高。

(5) 为了限制进入公用电网的 SVC 产生的谐波电流，应设置滤波支路。由于滤波器安装地点的确定以及滤波容量的设置受许多因素的制约，必须确立基本设计原则，进行综合考虑以充分发挥滤波效果，同时要防止无功倒送，消除谐振现象。

(6) 由于现有的动态功率因数补偿装置一般并没有实现整网联调，所以，有必要增加动态功率因数补偿装置的数据通信功能，将其工作状态及相关的电流、电压、功率因数、工作温度、环境状态等参数发送到调度室，调度室中的主控微机则根据前端工作状态实时调整控制参数达到整网均衡运行的目的。

SVC 动态无功补偿技术是电容器无功补偿装置基础上的技术进步，推广应用 SVC 动态无功补偿技术，以至推广应用更为先进的 SVG 动态无功发生器技术，是当前电力系统节能降耗的重要技术措施和发展方向。但在工程设计和技术实施中，应结合客观条件和实际需求，有针对性的进行选择和应用，充分挖掘和发挥先进技术的先进功能和潜力，不断提高电网运行的安全性、经济性和可靠性。然而，SVC 也有其自身的弱点，由于它是阻抗型补偿，随着电压的降低其无功输出也会与电压成平方关系降低。若采用基于电压源逆变器的 STATCOM 将会取得更好的效果。

### 1.1.3.2 STATCOM 的工作原理及在电网中应用

我国首次研制成功的  $\pm 20\text{Mvar}$  STATCOM 的总体构成框图如图 1-5 所示。它主要由直流电压源（通常以直流电容代替）、基于 GTO 的逆变器和连接变压器三部分组成。以二极管构成的整流桥从交流系统吸取少量有功功率对



直流电容 C 充电, 保持其电压稳定。控制器根据电网无功变化情况, 通过 6 个全控型开关器件构成的三相逆变器向系统输入感性或容性无功。STATCOM 向系统注入的无功  $Q$  为

$$Q = \frac{U_s^2}{2R_s} \sin 2\delta \quad (1-2)$$

式中  $U_s$ ——系统电压;

$R_s$ ——逆变桥等效电阻;

$\delta$ ——SVG 输出电压与  $U_s$  的夹角。

由式 (1-2) 可知, 通过调节  $\delta$  的大小, 就可以控制 STATCOM 注入系统的无功功率。由于  $R_s$  很小, 所以调节范围非常大。如果多台 STATCOM 并联移相输出, 则既可提升补偿容量, 又能抑制装置本身的谐波电流。

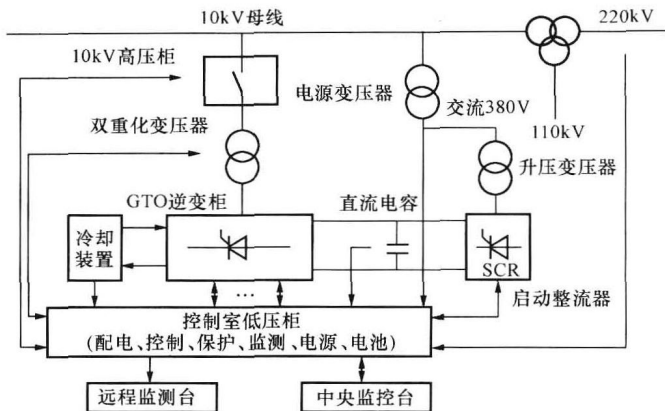


图 1-5 ±20Mvar STATCOM 总体构成框图

STATCOM 在控制策略上与 SVC 的区别在于: 在 SVC 装置中, 由外闭环调节器输出的控制信号用作 SVC 等效电纳的参考值, 以此信号来控制 SVC 调节到所需的等效电纳。而在 STATCOM 中, 外闭环调节器输出的控制信号则被视为补偿器应产生的无功电流 (或无功功率) 的参考值, 然后由参考值调节 STATCOM 来产生所需无功电流。其具体控制方法可分为间接控制和直接控制两大类, STATCOM 采用电流直接控制方法的响应速度和控制精度比间接控制法有很大的提高。

STATCOM 在输电系统中的作为无功补偿装置用时, 除具有 SVC 的所有良好性能外, 运行范围更宽, 且输出无功电流不受系统电压影响。采用多重化