

# 沈阳工程学院

## 毕 业 设 计 论 文



院系名称：电力学院

专业班级：电气工程与智能控制 电智 171

学生姓名：张某某

指导教师：李某某

密级：内部

# SVC 和 TCSC 无功补偿方法的研究

## Research on reactive power compensation method of SVC and TCSC

班 级：\_\_\_\_\_电智 171\_\_\_\_\_

学生姓名：\_\_\_\_\_张某某\_\_\_\_\_

学 号：\_\_\_\_\_2017105107\_\_\_\_\_

指导教师：\_\_\_\_\_李某某\_\_\_\_\_

## 摘 要

现如今电能因为其高效、清洁的特点，成为主要的能源方式，然而因为能源几乎分布在远离负荷中心的区域，电能的远距离输送成为一项极大考验。随着社会对用电量的需求逐步增加，柔性交流输电系统技术（FACTS）使电网运行更加稳定、安全、可靠，这项技术的研究引起了广泛的关注。在 FACTS 中，静止无功补偿器（SVC）和可控串联补偿器（TCSC）是现今最为常用的无功补偿装置。

SVC 是目前基于 FACTS 技术应用最广泛的无功补偿装置之一，SVC 是动态补偿装置，可以实现对无功功率连续平滑地快速调节，并以此调节输电系统中它所连接的节点电压。可控串联补偿器（TCSC）具有性能效益和经济效益的潜在性，可连续平滑地调节且调节的阻抗范围比常规机械控制的串联电容器更大更快速，有着提升输电效率、维护系统稳定、避免大幅振荡的优点。

本文分析了电力系统无功补偿的目的、意义、及其发展现状，概述了 FACTS 的主要装置和分类，重点研究了 SVC、TCSC 两种无功补偿装置。首先对 SR 型、TCR 型、TSC 型三种单立式 SVC 装置以及 FC+TCR 型、MSC+TCR 型、TCR+TSC 型三种组合式 SVC 装置在基本结构、工作原理、工作特性几个方面进行了较为深入的研究，并总结了 SVC 装置的主要应用范围。然后对 TCSC 装置的结构和原理进行分析，并且从理想基波阻抗和稳态阻抗两个方面研究了其阻抗特性。最后以 MATLAB 软件为工具分别完成了 TCR+TSC 型 SVC 和 TCSC 仿真模型地建立，通过对 SVC 仿真结果的分析得出了 SVC 装置可以根据电压升降来吸收或发出无功来维持电压稳定的结论，通过分析 TCSC 的仿真波形得出 TCSC 装置应用于电力系统可提高传输功率的结论。

**关键词：**可控串联补偿器，静止无功补偿器，无功补偿，柔性交流输电系统

## Abstract

Nowadays, because of its high efficiency and cleanness, electric energy has become the main energy mode. However, because the energy is almost distributed in the area far away from the load center, the long-distance transmission of electric energy has become a great test. With the increasing demand of electricity consumption in society, the flexible AC transmission system technology (FACTS) makes the power grid run more stable, safe and reliable, and the research of this technology has attracted wide attention. In FACTS, static var compensator (SVC) and controllable series compensator (TCSC) are the most commonly used reactive power compensation devices.

At present, SVC is the most widely used reactive power compensation device based on FACTS technology. SVC is a dynamic compensation device, which can realize continuous, smooth and rapid adjustment of reactive power, and thus adjust the node voltage connected to the transmission system. TCSC has the potential of performance benefit and economic benefit. It can continuously and smoothly adjust and adjust the impedance range larger and faster than conventional mechanically controlled series capacitors, which has the advantages of improving transmission efficiency, maintaining system stability and avoiding large oscillation.

This paper analyzes the purpose, significance and development status of reactive power compensation in power system, summarizes the main devices and classification of FACTS, and focuses on SVC and TCSC reactive power compensation devices. Firstly, SVC is classified into discrete and combined types, and the basic structure, working principle and working characteristics of several SVC are studied in depth, and several main application aspects of SVC devices are summarized. Then, the structure and principle of TCSC device are analyzed and summarized, and its impedance characteristics are studied from two aspects of ideal fundamental impedance and steady-state impedance. At last, the simulation models of SVC and TCSC are established with MATLAB software, and the waveforms of the two devices after putting into the system are obtained. By analyzing the waveforms, it is verified that SVC devices can absorb or emit reactive power according to voltage fluctuation to maintain voltage stability. By analyzing the simulation waveforms of TCSC, it is concluded that TCSC devices can improve transmission power when applied to power system.

**Key words:** controllable series compensator, static var compensator, reactive power compensation, flexible AC transmission system

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract .....	II
1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 无功补偿的基本内容.....	1
1.2.1 无功补偿的目的.....	1
1.2.2 无功补偿的意义.....	1
1.2.3 无功补偿的研究状况.....	2
1.3 柔性交流输电系统.....	2
1.4 本文研究的主要内容.....	3
2 SVC 的工作原理及特性.....	4
2.1 SVC 的基本概念.....	4
2.2 SVC 的分类.....	4
2.3 单立式 SVC.....	4
2.3.1 饱和电抗器.....	4
2.3.2 晶闸管控制电抗器.....	5
2.3.3 晶闸管投切电容器.....	7
2.4 组合式 SVC.....	8
2.4.1 FC+TCR 型 SVC.....	8
2.4.2 MSC+TCR 型 SVC.....	8
2.4.3 TCR+TSC 型 SVC.....	8
2.4.4 组合式 SVC 的比较与总结.....	9
2.5 SVC 实际应用.....	9
2.6 本章小结.....	10
3 TCSC 的原理及特性研究.....	11
3.1 TCSC 的基本结构.....	11
3.2 TCSC 的工作原理.....	11
3.3 TCSC 的基本工作模式.....	11
3.4 TCSC 的阻抗特性.....	11
3.4.1 理想基波阻抗.....	11
3.4.2 稳态阻抗特性.....	12
3.5 本章小结.....	12

---

4 SVC 与 TCSC 的建模仿真分析 .....	13
4.1 SVC 的建模和仿真 .....	13
4.1.1 SVC 仿真模块的建立 .....	13
4.2 本章小结 .....	13
结    论 .....	14
致    谢 .....	15
参考文献 .....	16

## 1 绪论

### 1.1 研究背景及意义

随着现代社会的日益发展，国家与人民对能源的需求不断增长，我国的能源分布格外不平均，大部分能源都处在经济不发达地区并且远离负荷中心，所以超高压远距离输电成为我国发展阶段的重要问题，系统安全稳定问题更为突出。伴随着现代大型与特大型电网的不断建立以及各种新能源发电技术突破，我国电力系统总装机容量上升到了一个新的高度。

但是在技术进步的同时也产生了大大小小的问题。比如由于现今具有非线性、功率因数低、冲击性等特点的电气设备连接到电网中的数量不断增加，电网中谐波电流也随之大量增加，以至于出现功率因数低、波形畸变、电压大幅度波动等一系列电能质量问题，甚至有可能损毁使用设备，造成安全问题。为了电网能够安全可靠地运行，电压的质量需要得到保证<sup>[1]</sup>。为了应对电网中出现的一系列问题，柔性交流输电系统技术（Flexible AC Transmission System，简称 FACTS）的提出和应用极大解决这些难题。

### 1.2 无功补偿的基本内容

#### 1.2.1 无功补偿的目的

研究无功补偿的目的，概括地讲有以下三个方面。

- （1）可以应对相关无功功率在电力系统中衍生出的一系列技术问题。
- （2）可以保证电能质量保持在良好水平。无功功率的不平衡致使电压的上升或下降而电压大幅度波动会对电力设备造成不可逆的伤害，还会影响产品质量等，为此需要无功补偿的措施来预防或解决。
- （3）实现无功功率的最优经济化，无功功率在电网不断循环中会造成大量的二次能源浪费。在电力运行中，合理使用统计、分析等必要手段来处理无功功率问题，就可以达到最优经济运行。

#### 1.2.2 无功补偿的意义

有功功率不变的前提下，无功功率增加，功率因数随之减小，视在功率随之增大，输电线路压降也会加大，所以要增大发、输电设备的容量，以至于加重了电力投资、损耗、运行等费用，不利于经济运行，也不利于电能输送与应用。电网无功功率不平衡会引起系

统电压波动剧烈，甚至会损毁设备引发安全隐患，因此无功补偿技术的研究与发展与电力系统能否安全、经济、可靠地运行息息相关。

近年来，工业用户对电能质量的要求越来越高，伴随着大型可控硅装置的大量应用和功率冲击性负荷不断增加，供电系统电压的波动变得剧烈、功率因数变低利用无功补偿技术能够提高电压稳定性和功率因数，还能降低网损，使输电效率和设备利用率上升，保证系统的功率平衡和安全运行<sup>[2]</sup>。因此，不管为了提高电网输电能力、减小损耗、提高稳定性，还是为了使供电质量保持在良好的状态下，装设大量的无功补偿装置对电力系统的各方面来说都必不可少。

### 1.2.3 无功补偿的研究状况

进行无功补偿的手段对于国内来讲用的主要是并联电容器。为了满足电压的调节要求，可以在 10KV 以下的低压和 35KV-60KV 左右的中压供电网络安装适合数量的并联电容器组。无功的补偿问题越来越受到有关部门的重视，目前国内，机械投切电容器（MSC）的方式还是比较普遍的，因其装置简单、可分级分组投切的特点，在负荷波动和频率波动小、对响应速度要求不高的配电网络中仍广泛使用，但是它不属于动态补偿。国内的动态补偿领域范围内，SVC 装置占据主要地位。目前国内在配电网范围的 SVC 装置已经实现自主化，35kV 及以下的 SVC 装置已经可以自主研发和生产。2004 年 11 月 3 日上午，鞍山红一变电站 SVC 工程的建成投运标志着中国拥有自主知识产权 SVC 技术进入了实用化阶段，但对于电压等级大于 500kV 或容量较大的输电系统来讲，SVC 装置的实际运用仍需进一步的研发<sup>[3]</sup>。

国外进行无功补偿一般采用 SVC 装置和电容器，就这项技术研究而言，国外的经验较为丰富，已经取得许多研究成果。现今 SVC 装置在一些发达国家如欧、美、日而言，应用已经格外广泛。除此之外，一些其他的无功补偿技术如 STATCOM、SVG 等装置的发展也不断进步<sup>[4]</sup>。用户对电能质量地要求越加地严格，为了保证供电质量，SVC 装置的需求越来越大，中国需要做的就是尽可能快的突破 SVC 研究和发展，以满足国内自我需求，打破国外企业的垄断趋势。

## 1.3 柔性交流输电系统

柔性交流输电系统是基于微机处理技术、通信技术、控制技术和电力电子技术所提出和应用的一项重大电力工业技术成就。柔性交流输电技术实际上是新型综合性的技术，即将电力电子、控制以及微机处理等不同领域的技术与电力系统相结合。柔性交流输电系统主要是将现代控制理论和电力电子技术应用于交流输电系统的基础上，可以灵活控制交流输电系统参数和网络结构。



目前为止，已经广泛应用于现实工程当中的 FACTS 装置分类如表 1.1 所示。

表 1.1 FACTS 的分类

串联型	并联型	综合型
可控串联补偿器 (TCSC)	静止无功补偿器 (SVC)	统一潮流控制器 (UPFC)
相间功率控制器 (IPC)	可控快速制动电阻器 (TCBR)	可控移相器 (TCPR)
固态串联补偿器 (SSSC)	静止同步补偿器 (STATCOM)	

FACTS 技术在现代电力研究领域范围之内收到了强烈的关注，被誉之为“珍顶变革性的前沿课题之一”。在欧洲及日本等一些发达国家之间，FACTS 技术在最近十几年的发展下，已经广泛运用于实际的电力工程当中。也有一些 SVC 装置应用到我国电压等级为 500kV 的变电站中，此外 TCSC 和 STATCOM 这两种补偿装置的发展应用也日趋成熟，由此可见，FACTS 装置的研发在未来很一段时间仍是整个社会需要关注的焦点。

## 1.4 本文研究的主要内容

本文主要对 FACTS 装置中应用最为广泛的 SVC 和 TCSC 这两种无功补偿装置进行研究，并分别进行仿真分析。主要工作如下：

- (1) 分析了电力系统无功补偿的作用、重要性及其发展和状况。
- (2) 重点对 FACTS 装置中的 SVC 和 TCSC 两种无功补偿装置基本结构、工作原理、工作特性几个方面的进行研究分析。
- (3) 以 MATLAB 软件为媒介完成 SVC、TCSC 模型的建立并根据产生的波形分析两种装置的补偿作用及应用场景。

## 2 SVC 的工作原理及特性

### 2.1 SVC 的基本概念

SVC 最基本的两种结构是晶闸管相控电抗器 (TCR) 和晶闸管投切电容器 (TSC), 通常由一个电感元器件和滤波器 (或者并联电容器组) 构成。SVC 装置通过跟踪负荷或系统的无功变化进行补偿以保证电压保持在允许范围, 与一般并联电容器的补偿方式并不相同。SVC 本质为其输出随着特定的电力系统控制参数的改变其输出随之改变的静止无功补偿装置。它可以完成频繁且快速地调节和投切动作, 与机械设备来比具有速度上的明显优势。

SVC 能够达到连续平滑且快速地调节无功功率, 进而调节 SVC 所连接的节点电压, 实现动态补偿的要求。SVC 之所以应用范围广, 主要因为它静止型和能够及时监察到无功需求来进行调节完成动态补偿两大特点。

### 2.2 SVC 的分类

SVC 是目前在电力系统中应用最为广泛的一种并联补偿设备, 它也是应用较早的 FACTS 设备。SVC 可分为单立式 SVC 和组合式 SVC, 如表 2.1 所示。

表 2.1 SVC 的分类

单立式 SVC	组合式 SVC
饱和电抗器 (SR)	固定电容器和晶闸管控制电抗器 (FC+TCR 型 SVC)
晶闸管控制电抗器 (TCR)	机械投切电容器和晶闸管控制电抗器 (MSC+TCR 型 SVC)
晶闸管投切电容器 (TSC)	晶闸管投切电容器和晶闸管控制电抗器 (TCR+TSC 型 SVC)

### 2.3 单立式 SVC

#### 2.3.1 饱和电抗器

饱和电抗器是早期的 SVC 装置, 可以分为自饱和电抗器如图 2.1 所示和可控饱和电抗器如图 2.2 所示。饱和电抗器的响应速度比同步电容器更为快速, 非线性电路中的某些特殊问题导致电抗器不能利用调节相位的方式来调节负载。正是由于这些性能上的缺陷, 所

以电抗器在无功补偿技术中不占主要地位，几乎只用于超高压输电线路。

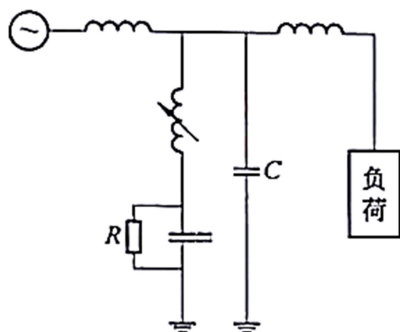


图 2.1 自饱和电抗器结构图

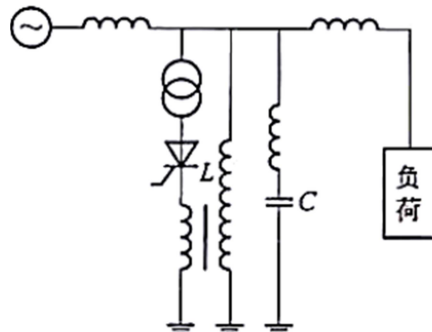


图 2.2 可控饱和电抗器结构图

在可控饱和电抗器中，其作用为：

（1）限制工频过电压。可控并联电抗器的容量在电力系统正常运行中可以随着线路所传输的功率自动进行平滑调节，统快速调节，达到限制工频过电压的目的。

（2）消除发电机自励磁。发电机的自励磁现象可能发生在带空偿容量会进行自动调节。

（3）限制操作过电压。进而限制了系统的操作过电压。

### 2.3.2 晶闸管控制电抗器

#### （1）基本原理

TCR 是 SVC 的重要组成部分。它是一种晶闸管并联控制电抗器，反并联晶闸管就像一个双向开关。如图 2.3 所示，基本的单相 TCR 结构如图 2.3 所示，一对反并联晶闸管 T1 和 T2 串联于线性空心电抗器，反并联晶闸管就像一个双向开关。晶闸管的触发角由两端电压的过零点计算，T2 导通时处于电源电压的正半部分，而 T1 导通时处于电源电压的负半部分。

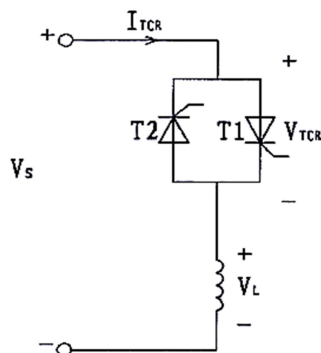


图 2.3 TCR 的基本结构

晶闸管全导通时 TCR 的触发角  $\alpha=90^\circ$ ，流过 TCR 的电流波形为连续的正弦波。当触发角增大至  $180^\circ$  时电流为零，流过 TCR 的电流波形变为不连续的脉冲波，并且对称地分布在正半波和负半波中。当 TCR 触发角低于  $90^\circ$  时，电流中出现的直流分量会破坏两个反平行分支的对称。

### (2) 主要接线形式

并引起更大的谐波扩散。TCR 的三相接线形式大多是 6 脉波接线，一般接为三角形形式，如图 2.4 所示，每相只有一对反并联晶闸管。这种形式的线电流谐波含量比其他形式的小，但当供电电压不平衡时，非特征谐波会扩散到线路中。在正常情况下，非特征谐波的值很小，强干扰情况下，正负半波的触发角出现不同，产生直流分量，而直流分量的存在会引起较大的谐波扩散。

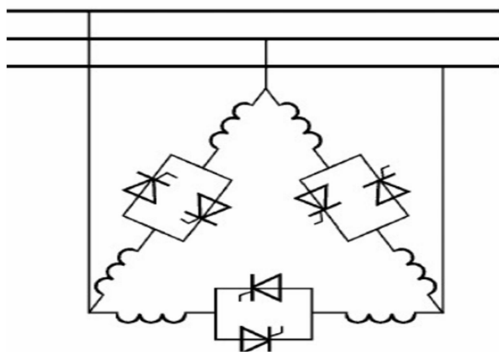


图 2.4 TCR 的三相 6 脉波接线形式

### (3) TCR 的运行特性

考虑到单向的 TCR 的基频特性，在分析其补偿性能时，谐波已经很小。所以整个 TCR 支路可以等效为一个连续可变的电抗器，如图 2.6 所示。

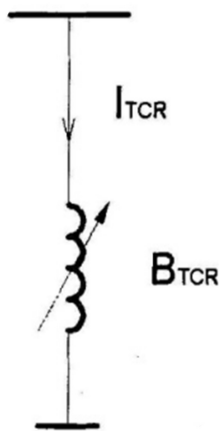


图 2.6 单相 TCR 基频等效电路图

### 2.3.3 晶闸管投切电容器

#### (1) 基本原理

TSC 是 SVC 的重要组成部分。基本的单相结构如图 2.9 所示，包括一对反向并联的晶闸管、一个电容器和一个串联的小限流电抗器，这些器件串联组成了 TSC 的基本模型，其中反向并联晶闸管有着双向开关的作用。检测到最小电压的那一刻，晶闸管导通。所以 TSC 装置的暂态分量基本上是初始暂态分量，电流波形接近于正弦，谐波含量可忽略不计，也就没有必要安装滤波器。在结构中串联的小电抗  $B$  是为了限制电流的暂态分量。

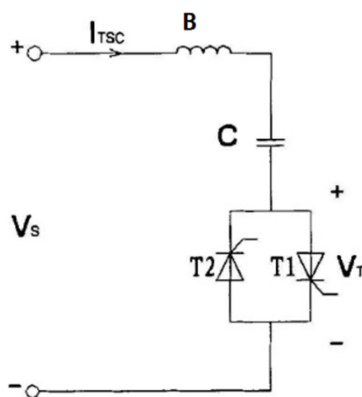


图 2.9 单相 TSC 的结构简图

TSC 的三相单元为三角形连接，包括三个单相 TSC，每个单相 TSC 单元由三角形连接的变压器二次绕组供电。实际的补偿器由  $n$  个容量相同的 TSC 三相单元并联组成，如图 2.10 所示为 TSC 的通用接线方案。

#### (2) 运行特性

TSC 装置的电压-电流特性表现出离散性，如图 2.11 所示。TSC 的单元数量、各单元的容量、用来避免电容器频繁投切的滞环电压  $\Delta V$  三个主要因素决定了 TSC 的运行特性。在电压闭环控制时，将母线电压调节到  $V_{ref} \pm \Delta V / 2$  范围内<sup>[8]</sup>。

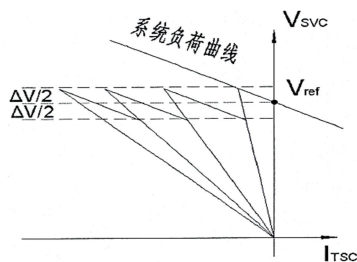


图 2.11 TSC 的运行特性

## 2.4 组合式 SVC

### 2.4.1 FC+TCR 型 SVC

FC-TCR 型 SVC 的单相原理如图 2.12 所示，电容支路为固定连接，TCR 支路采用延时触发控制，形成连续可控的感性电抗。一般来说，为了可以输出容性无功，也可以输出感性无功功率，TCR 的容量要大于 FC。

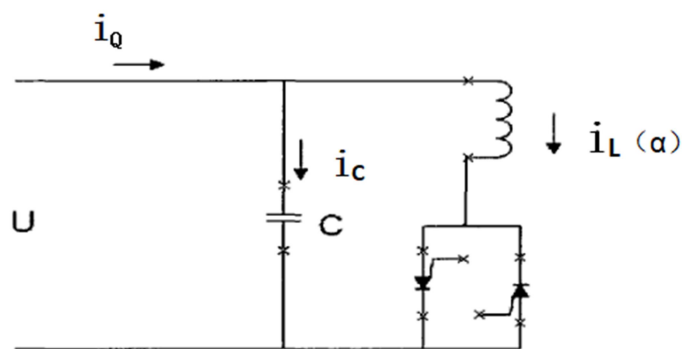


图 2.12 FC-TCR 型 SVC 单相结构图

### 2.4.2 MSC+TCR 型 SVC

在某些应用中，比如 MST-TCR 装置应用于无需频繁投切电容器的情况下，成本比使用 TST-TCR 装置低得多。不同类型 MSC+TCR 型 SVC 装置结构如图 2.16 所示。一种是机械开关切换的电容器直接安装在高压母线上，此时需要在变压器的二次侧安装一个固定谐波滤波器，这个滤波器并联于 TCR 来降低变压器的谐波负荷。另一种机械开关切换的电容器安装在中压母线上<sup>[9]</sup>。

### 2.4.3 TCR+TSC 型 SVC

#### (1) 基本结构

$n$  个 TSC 单元并联 1 个 TCR 构成了 TSC-TCR 型 SVC 的基本结构，如图 2.17 为通用的 TSC-TCR 型 SVC，SVC 总容量的  $1/n$  等于 TCR 的容量。电容器的控制测略可以为分级投切，连续调节各级之间无功功率的连续调节可以通过 TCR 实现，所以为了与平滑调节无功的 TCR 的容量一致，SVC 会相应减少它的最大感性范围。

## (2) 运行特性

TSC-TCR 型 SVC 的外特性与 FC-TCR 型 SVC 具有相似性,都表现为在一定范围可以响应速度跟踪输入容抗参考值或无功电流的可控容抗。TSC-TCR 型 SVC 的电压-电流运行区域包含了两组 TSC, 每组 TSC 容抗为  $B_C$ 。如图 2.18 所示, 其中:  $B_{Lmax}$  表示 TCR 的最大感抗;  $U_{Cmax}$  表示 TSC 耐受电压;  $I_{Cmax}$  表示 TSC 耐受电流;  $U_{Lmax}$  表示 TCR 耐受电压;  $I_{Lmax}$  表示 TCR 耐受电流。在稳态条件下, FC-TCR 型 SVC 与 TSC-TCR 型 SVC 的运行区域在稳态条件下是相同的。

## 2.4.4 组合式 SVC 的比较与总结

不同结构的 SVC 性能比较见表 2.2。

表 2.2 常用的几种组合式 SVC 的性能比较

形式	FC-TCR 型	MSC-TCR 型	TSC-TCR 型
调节范围	超前/滞后	超前/滞后	超前/滞后
控制方式	连续	连续	连续
调节灵活性	好	好	好
反应速度	较快	较快	较快
调节精度	好	好	好
产生高次谐波	多	多	多
电压调节效应	正/负	正/负	正
控制难易程度	较简单	较简单	复杂
维护检修	方便	方便	方便
噪声	小	小	小
分相调节	可以	可以	可以

SVC 的选择通常由实际要求、反应的速度快慢、运行的频率大小、损耗多少、投资运营成本等因素决定。目前, TSC-TCR 型 SVC 最通用的一种 SVC 结构, 但是其造价成本较高。

## 2.5 SVC 实际应用

SVC 的实际应用包括两种方式。第一种是广泛应用于配电网中满足用电负荷快速变化使用的无功需求。冶炼行业的电弧炉、各种轧机、采矿业的矿井提升机、港口的大型门型起

重机、电气化铁路的牵引变等均可安装 SVC，用于快速无功补偿，提高供电质量<sup>[12]</sup>。另一种是利用变压器输入方式，主要应用于输电网，可以调节系统阻抗和稳定性。

## 2.6 本章小结

本章从单立式和组合式两个方面分别研究了三种 SVC 补偿装置，介绍了最基本的两种 SVC 结构 TCR、TSC 的主要接线形式和配置，对这几种典型式 SVC 都进行了基本结构、工作原理以及工作特性等方面的研究。



### 3 TCSC 的原理及特性研究

#### 3.1 TCSC 的基本结构

如图 3.1 所示, TCSC 的基本模块由晶闸管控制的电抗器并联于一个串联电容器组成。TCSC 的主电路结构如图 3.2 所示, 一对反并联晶闸管串联于旁路电感  $L$  组成一条支路, 还包括了电容  $C$ 、金属氧化物保护设备 (MOV) 等基本设备。金属氧化物保护设备 (MOV) 相当于一个非线性电阻器, 从而加强了系统的稳定性<sup>[14]</sup>。

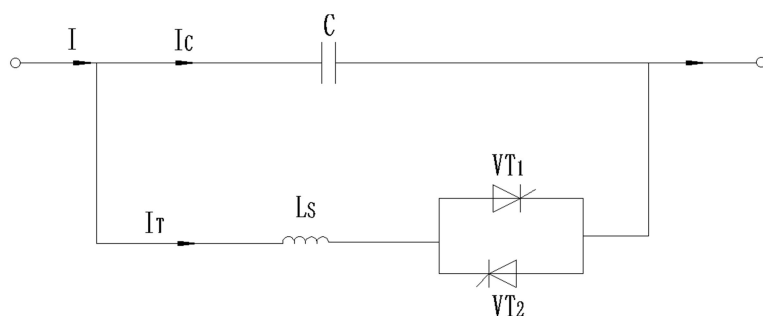


图 3.1 TCSC 的基本模块

#### 3.2 TCSC 的工作原理

TCSC 的工作原理类似与并联 LC 电路, 电感支路电流的大小可以利用晶闸管触发角的改变使其改变, 所以 TCSC 可以对其等效电抗进行连续调节。

#### 3.3 TCSC 的基本工作模式

图 3.3 中四条直线 A、B、D、E 的 TCSC 阻抗分别处于晶闸管触发角为最小值、 $180^\circ$ 、 $90^\circ$ 、最大值的状态, 曲线 C 反映了电容器耐流能力。TCSC 主要的运行模式如下<sup>[15]</sup>。

#### 3.4 TCSC 的阻抗特性

##### 3.4.1 理想基波阻抗

在理想状态下 TCSC 可看作单纯的可变电容, 电容电压的波形为正弦波, 这时 TCSC

的等值电抗即为理想基波阻抗，可由下式（3.1）表示：

$$X = \frac{\pi X_L}{2\sigma - \sin 2\sigma + \frac{\pi X_L}{X_C}} \quad (3.1)$$

式中， $X_C$  表示固定容抗、 $X_L$  表示 TCR 支路感抗、 $\sigma$  表示导通角。

### 3.4.2 稳态阻抗特性

TCSC 在电力系统中，TCSC 的控制方式一般采用快速改变基频等效阻抗的大小或性质。在电力系统工作中，TCR 和电容器构成了 TCSC 的基频等效阻抗（频率为 50Hz 时的等效阻抗）TCSC 的稳态基频等效阻抗值可由式（3.2）计算：

$$X_{TCSC} = -\frac{1}{\omega C} + \frac{k^2(2\sigma + \sin 2\sigma)}{\omega C \pi(k^2 - 1)} - \frac{4k^2 \cos^2[k \tan(k\sigma) - \tan \sigma]}{\omega C \pi(k^2 - 1)^2} \quad (3.2)$$

式中， $k = \frac{\omega_0}{\omega}$ ；

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}；$$

$$\sigma = \pi - \alpha。$$

## 3.5 本章小结

可控串联补偿器（TCSC）在 FACTS 装置中占有重要地位，它有着性能效益、经济效益的潜在性。本章从 TCSC 的物理模型、基本结构对 TCSC 进行基本介绍，并且分析 TCSC 不同状态下的工作模式，研究了 TCSC 的理想基波阻抗和稳态基波阻抗，还分析了 TCSC 不同工作条件下的运行特性。

## 4 SVC 与 TCSC 的建模仿真分析

### 4.1 SVC 的建模和仿真

#### 4.1.1 SVC 仿真模块的建立

对 SVC 进行物理建模，通过 Matlab 的 simulink 功能搭建模型并进行仿真，经过上述可知 TSC-TCR 型 SVC 可以克服 TSC 型 SVC 只能阶梯变化方式满足系统无功需求和 FC-TCR 型 SVC 在需要实现无功输出从感性到容性调节时容量加大的缺点，具有性能上的优越性，所以在本文中选用了组合式 SVC 中 TCR-TSC 型 SVC 进行建模仿真，搭建的模型如图 4.1 所示。此模型是主电路结构由一个短路功率为 6000MVA 的三相电压源串上一个 200MW 的负荷所组成，在负荷端并联了一台耦合变压器，耦合变压器的参数设定为 735KV/16KV。耦合变压器的二次侧接入了一个 SVC，这个 SVC 装置由一台 109Mvar 的 TCR 和三台 94Mvar 的 TSC 并联构成<sup>[17]</sup>。

### 4.2 本章小结

本章利用在 MATLAB 中的 simulink 模块对 SVC 和 TCSC 装置建立了仿真模型，并对其运行结果进行具体分析。通过仿真结果可知，SVC 装置应用于电力系统中可以维持电压的稳定性，在电压增大时，SVC 开始吸收无功使电压减小，电压减小时 SVC 发出无功使电压增大，保证电压始终维持在规定范围内。通过对 TCSC 仿真结果分析了 TCSC 在容性微调模式和感性微调模式不同状态下的的工作稳定性，得知在容性微调模式下 TCSC 工作比较稳定。还将应用 TCSC 装置线路的有功功率波形图、TCSC 等效阻抗波形图、触发角波形图进行比较，触发角发生变化，TCSC 的等效阻抗也随之变化，当 TCSC 呈现感性补偿时，有功功率随着有效电抗的增加也有所增加，有功功率实现调节，即  $P$  随着  $\alpha$  的改变而作相应的变化。

## 结 论

伴随着社会和科技的逐步发展，人们的用电量一天天急速提升，为了电能需求平衡的要求，大量超高压远距离输电系统开始建立并迅速发展，但随之而来的，技术发展的同时也引发了一系列系统的稳定性和电能质量方面的问题。在这种环境下，无功补偿就显得格外重要。现今阶段，柔性交流输电系统（FACTS）是我国研究与发展无功补偿装置的主要方向，在柔性交流输电系统中，SVC 和 TCSC 是极为重要的组成部分。

在本文中，我在无功补偿的基本理论知识的基础上，主要研究了 FACTS 装置中的 SVC 和 TCSC 装置，主要研究方面如下：

（1）研究了本论文中课题研究的背景和意义，对无功补偿的重要性及我国无功补偿现状进行了简要说明。

（2）分三个小节总结了无功补偿的基本内容，包括无功补偿的目的、意义、研究现状。还单独分析了柔性交流输电系统（FACTS）的基本内容和主要的几种装置的分类。

（3）完成对 SVC 装置和 TCSC 装置的工作结构、工作原理、工作特性等方面的研究。在 SVC 装置研究中还将其进行分类，分别选用三种典型装置一个个单独分析，并且对不同的 SVC 进行了性能比较。

（4）以 MATLAB 软件为媒介建立了 TCR-TSC 型 SVC 和 TCSC 的模型并对其仿真结果进行分析，验证了 SVC 装置的用以维持电压稳定性的作用，也分析了 TCSC 在不同状态下的工作稳定性，还得出含有 TCSC 装置的系统功率  $P$  随着  $\alpha$  的改变而变化的结论。

本文通过对 SVC 装置和 TCSC 装置的介绍和仿真研究，知道了这两种无功补偿装置的主要原理和特性，也通过 TCR-TSC 型 SVC 的仿真结果知道了 SVC 装置在电力系统中可根据实际情况导通和关断来实现无功补偿，维持电压稳定性，所以可以应用于对电压质量要求较高的系统中。通过 TCSC 装置的仿真结果验证了系统功率  $P$  随着  $\alpha$  的改变而作相应的变化，所以 TCSC 装置可以应用于系统中来提高线路输电能力而提高电能的输送功率。

总体来讲，SVC 无功补偿装置技术的发展已经比较成熟并且广泛应用于实际电力系统或电力工程中，TCSC 装置的发展与应用在 FACTS 技术中也占有重要地位。尽管现今仍有许多技术难题尚未解决，但是目前无功补偿技术一领域发展迅猛，形势大好，那些还未攻克或完善的各个方面缺陷在不久的将来都会一一解决。

## 致 谢

时光如同一尾游鱼一般在这大学四年的时间河流中一跃而过，转眼已是到达了尾声，我的毕业设计也已经结束。在毕业设计过程中，我感慨良多，千言万语不知该如何表达，最后竟只能贫瘠地说一声感谢。在这大学四年里，我完成了从青涩稚嫩到逐步成熟稳重的蜕变，在老师的指导和同学的帮助下从蹒跚学步到稳步前行，我知道，尽管马上要面对离别，但我知道这里的一切都将贮藏在我心里。

首先，我想对我的指导老师老师郑重地说一声感谢，从刚开始毕业设计的紧张不安、迷茫无措，到现今毕业论文的完成，每一次我言语的措辞，格式的修改，逻辑思维的迸发都离不开老师的引领和教导，在整个毕业设计过程中，老师一直严密关切着我的毕业设计进程，定时对我进行督促和指导，在我遇到问题或者失去研究方向时及时帮助我整理思路，安抚我的情绪。

其次，我想感谢沈阳工程学院，在这四年我度过了充实并伴有收获的时光，给了我一个发展自我，展示自我的平台，我学会了许多道理，得到素质与技能方面的升华，并且成功签约了心仪的工作。这四年的大学时光，使我完成了从单纯的校园到社会的完美过渡，在这里既有校园的单纯美好，又有社会的精明干练，渡过这四年的淬炼，我收获了更好的自己。

最后我想对这四年中相处的同学、曾经任课的老师说声感谢，在他们的帮助下，指导下，在我伤心时陪伴，迷茫时安慰，困难时伸出援手，陪我渡过这四年的难忘时光，现在的离别是为了下一次更好的相遇，我相信，每一个沈阳工程学院的学子都会向阳而生，收获更好的明天。

## 参考文献

- [1] 栗时平.静止无功功率补偿技术[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [2] 赵新卫.中低压电网无功补偿实用技术[M].北京:电子工业出版社,2010.
- [3] 刘树维.无功补偿设备[M].北京:中国水利水电出版社,2019.
- [4] 李宏仲,金义雄.地区电网无功补偿与电压控制学[M].北京:机械工业出版社出版社,2012.
- [5] 马乃兵.变电站并联补偿电容器组的配置[J].电力电容器与无功补偿, 1999(2):11-14.
- [6] 赵杰.TCSC 在无功补偿中的应用研究[D].南昌:南昌大学, 2010.
- [7] Zhang Ding-hua,Gui Wei-hua,Liu Lian-qen.Comprehensive compensation system combining reactive power compensation and harmonic suppression for large-scale electric arc-furnace [J]. Power System Technology, 2008,32(12):23-24.