

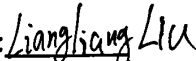
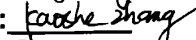
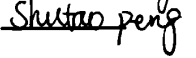
**Title: THE RESEARCH OF TCSC FOR IMPROVING THE POWER LIMIT UNDER TRANSIENT CONDITIONS IN THE SHANXI POWER SYSTEM OF CHINA**

**Major: Power System and its Automation**

**Name: Liangliang LIU**

**Supervisor: Prof. Kaoshe ZHANG**

**Engineer.Shutao PENG**

**Signature:**   
**Signature:**   
**Signature:** 

## **Abstract**

This paper in view of the Shanxi power system from North Shanxi to the Guanzhong power transmission engineering in affects south the electricity as a result of the transition condition stability problem to deliver the transmission power the actual situation, using FACTS technology, enhances the stability limit by the researching TCSC. The work includes the following parts:

1. According to the TCSC basic structure and movement way research, obtains the TCSC fundamental wave impedance by infer the mathematical model of TCSC with the time domain method;

2. Analysis the advantage and disadvantage of three kinds TCSC tidal current computation model, obtains the iterative algorithm to include the TCSC electrical power system tidal current computation model alternately;

3. By the research of the TCSC damping characteristic and analysis the existing control technology and the stable computation model of TCSC, obtains the TCSC transition condition stable computation model with PID control algorithm;

4. Using the TCSC tidal current computation model, considered electrical power system analysis assembly program (PSASP), programming the TCSC system tidal current interface routine compilation by FORTRAN;

5. In a four machine two regional system, through installed around the TCSC installment to the system line to carry on the simulation computation separately, confirmed the validity of the tidal current computation model and the PID control model that used in this article used.

6. In the Shanxi electrical network system, using the PID controlled variable grouping choices way, searching for the ideal PID controller parameter in not forced the link separately and includes forces the link models, obtains the most superior control policy finally.

**Keywords:** simulations PSASP TCSC PID transient stability

# 独创性声明

秉承祖国优良道德传统和学校的严谨学风郑重声明：本人所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本文所研究的工作和成果的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及其相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任

论文作者签名：刘梁亮 2008年4月2日

# 学位论文使用授权声明

本人\_\_\_\_\_在导师的指导下创作完成毕业论文。本人已通过论文的答辩，并已经在西安理工大学申请博士 / 硕士学位。本人作为学位论文著作权拥有者，同意授权西安理工大学拥有学位论文的部分使用权，即：1) 已获学位的研究生按学校规定提交印刷版和电子版学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，可以将学位论文的全部或部分內容编入有关数据库进行检索；2) 为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文或解密后的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所或在校园网上供校内师生阅读、浏览。

本人学位论文全部或部分内容的公布（包括刊登）授权西安理工大学研究生部办理。

（保密的学位论文在解密后，适用本授权说明）

论文作者签名：刘梁亮 导师签名：张群社 2008年4月2日

# 1 概述

## 1.1 课题背景及研究意义

随着我国经济的快速发展,对可靠、安全、可控、经济和高质量的电能需求持续增长,电力系统的规模正以较快的速度扩大。由于我国能源分布不均,负荷中心远离能源中心,使得跨区域联网、高电压、远距离输电势在必行。这种远距离、大容量的高压输电系统送受端的电压相角差较大,稳定裕度较小,输送容量受系统稳定极限的限制。在这种形势下,寻找新的控制装置使现有的输电线路损耗最小、稳定输送容量最大是很有价值的。目前,这些目标主要是通过通过对输电线路的无功功率进行控制来实现的。传统的电力系统(无FACTS元件)的输电线路参数是固定的,缺乏对系统参数和网络结构快速、灵活的控制手段,使得线路的同步稳定极限通常远小于热稳定极限,也就是说传统的电力系统输送电力的能力没有得到充分的利用。随着晶闸管的出现和应用,产生了一种新型的基于晶闸管的无功功率控制装置,它具有非常快的响应速度,利用这种快速响应特性可以将阻尼控制功能加入到无功功率和电压控制中,这就是FACTS装置。

随着陕西电网的发展,根据目前的系统分析,在未来3-5年内,陕西电网的局部地区存在几个问题,其中一个有待解决的问题就是陕北电网火电基地(装机容量2000MW)建成后,电能经陕北电网长距离送至关中电网时,系统稳定水平较低。所以系统的动态安全性制约了电网的输送能力和电网的电压水平,不能使电网充分发挥其能力,从而严重的影响了系统的经济性。架设新的、更高电压等级的输电线路可以从根本上强化电网构架,提高电网的输送能力。但是,显然这需要巨大的建设投资并对自然环境带来损害。另外,在目前陕西电网的负荷水平和网架结构下,大量的潮流计算表明,限制功率输送的主要问题是暂态稳定极限而不是热稳定极限。因而利用TCSC柔性输电装置改善系统的动态特性、提高电网的输送能力,在目前的技术条件下是经济便捷的途径。本课题将在以往理论研究的基础上,进而研究TCSC技术在陕西电网实施的可行性,从而提高陕西电网断面输送功率,以解决目前陕西系统存在的局部电网稳定性问题。此问题的解决将最终使陕西电网断面的输送能力及电网电压水平充分提高,从而产生巨大的经济效益和社会效益,推动国家电网建设朝着提高技术水平的方向发展。

## 1.2 FACTS 技术

FACTS技术之所以出现,一方面是由于电力工业发展的实际需要,另一方面,大功率电力电子技术的发展使这种需求的实现成为可能。FACTS的概念自20世纪80年代中后期<sup>[1]</sup>被提出来以后,得到了全世界电力工程界的广泛重视,它是当前电力系统领域的研究热点,已被国内外的一些较权威性的输电技术研究者和工作组称为“现代电力系统中的三项具有变革性影响的前沿性课题(柔性输电技术、智能控制、基于全球卫星定位系统(GPS)的新一代动态安全分析与监测系统)之一”<sup>[2][3]</sup>。

FACTS 即“柔性交流输电系统”，指应用于交流输电系统的电力电子控制装置，其中的“柔性”是指对输电线电感和电容的可控性。FACTS 是利用大功率电力电子元器件构成的装置来控制或调节交流电力系统的运行参数、网络参数从而优化电力系统的运行状态，提高电力系统的输电能力的技术。FACTS 是各种新型电力电子控制装置应用的集成，这些控制装置对选定的一些输电线路既可以进行有功功率控制，也可以进行无功功率控制，以达到增强系统的稳定性、提高输电线路的传输能力的目的。

### 1.1.1 FACTS 的主要用途

不同类型的 FACTS 装置有着不同的功能，同一类型的 FACTS 装置用在不同的场合也可能具有不同的功能，但是它们具有以下几种一般性的用途：

- (1) 充分利用现有输电网络的传输能力。
- (2) 对系统电气参数如电压、电流、相角进行灵活的控制，提高线路的输送能力，改善系统的静态稳定性和暂态稳定性。
- (3) 通过增强网络间的联络，减少冷热备用，提高经济效益；控制给定线路上的功率使网损减小，满足经济运行的要求。
- (4) 限制由于设备故障引起的连锁反应，控制事故的范围以减小故障导致大面积停电的可能性。
- (5) 实现两个不同频率系统的互联，以及非同步系统互联。
- (6) 为电力市场的发展提供技术支持，保证通道的开放，为用户使用更便宜的电力创造条件。
- (7) 阻尼那些会损坏设备或限制输电容量的各种电力系统振荡。

### 1.1.2 FACTS 元件的分类

FACTS 技术的概念提出以后，一大批 FACTS 装置在电力系统中快速出现。这些装置按技术的成熟程度可以分为三类<sup>[4]</sup>：

- (1) 已在实际工程中大量应用的，如静止无功补偿器 (SVC)、晶闸管控制串联电容器 (TCSC)；
- (2) 已有工业样机，但仍处在研究阶段的，如统一潮流控制器 (UPFC)；
- (3) 刚刚提出原理设计，尚无工程应用的，如静止同步串联补偿器 (SSSC)、晶闸管控制的移相器 (TCPST) 等。

另外，按其在中系统中连接的方式，FACTS 装置又可分为串联型(如 TCSC、SSSC 等)，并联型(如 SVC、STATCOM 等)，综合型(如 TCPST、UPFC 等)。

柔性输电技术在工业发达国家已极大地刺激了电力电子工业和电力制造业的发展。但是由于该技术在我国的应用仍处在起步阶段，距离形成产业还有很大的距离。但是可以预

见，随着电力系统复杂性的进一步增加，特别是在放松管制的电力市场环境下，FACTS 装置将在未来的电力系统中发挥关键性的作用。

### 1.3 晶闸管控制串联电容器 (TCSC)

#### 1.3.1 TCSC 技术

TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation) 即晶闸管串联补偿 (如图 1-1) 就是 FACTS 装置的一种。本文研究 TCSC 对陕西电力系统暂态稳定性的影响,为应用 TCSC 提高系统的输送能力作先期的仿真计算研究。

TCSC 通过控制晶闸管的触发角,改变流过电抗器的电流值,从而改变 TCSC 的阻抗值。如果控制策略合适,TCSC 可以视为一个大范围快速平滑可调并可在容性和感性之间快速切换的阻抗,所以 TCSC 主要有以下优点和应用领域<sup>[5]</sup>:

(1) 提高输电系统的输送能力。利用 TCSC 可以提高系统某一输电走廊的输送能力和改善输电走廊上的电压分布。

(2) 提高系统稳定水平。如果安装位置合适,串联补偿能够减少机组间电气距离,增加同步力矩,提高稳定水平。

(3) 由于 TCSC 可以利用电容器的短时过载能力,因而提高系统暂态稳定水平的能力通常比常规串补高。

(4) 在网状电网中,TCSC 可根据系统运行条件(线路开断,发电机出力分布调整等)控制线路潮流,从而降低网损,消除潮流迂回,改善潮流分布,防止过负荷,提高输送能力。

(5) 增强系统阻尼。互联电网或地区电网之间在一定条件下会存在弱阻尼或负阻尼的振荡模式。利用 TCSC 可以改善阻尼,提高系统动态稳定性。

TCSC 可用于消除次同步谐振的风险,使补偿度提高。TCSC 通过一定的触发规律控制串联电容器和气轮发电机轴系之间的能量交换,抑制系统中的次同步分量,从而可以提高串补度而无发生次同步谐振的风险。

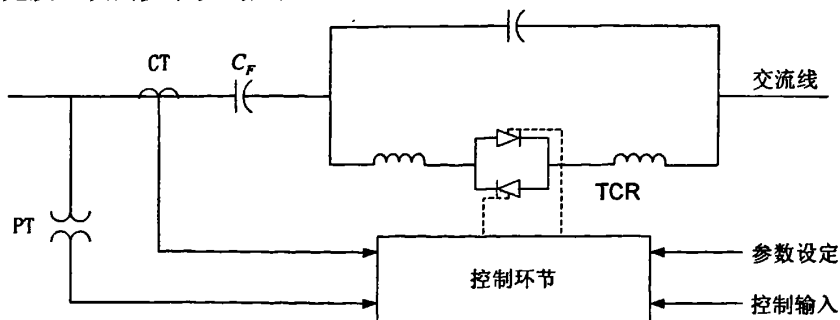


图 1-1 晶闸管串联补偿结构图

Fig 1-1 Thyristor series compensation structure

提高电力系统暂态稳定性的工业生产意义是很显然的。对于在已建成的系统上,如何在保证系统自身的安全条件,应尽可能地为社会提供优质低价的电能是电力科研的基本问题。理论上,TCSC加入系统后,系统控制手段增加,直观地,控制自由度增加,因而可以预见,合适的控制策略,合适的安装地点,合适的安装台数及各种控制器之间的协调必将对提高暂态稳定性产生积极的作用。但是,由于电力系统时大规模的非线性动力学系统,因而对它进行精确的解析在目前是不可能的。因而本研究的基本方法是通过数值试验的方法,对控制策略、安装地点进行初等的分析计算。

### 1.3.2 TCSC 国内外研究现状

#### a. 国外研究现状

目前世界上已经投入运行的柔性输电工程有很多。针对我国的具体国情,以 TCSC 和 SVG 的采用较为容易。TCSC 工程有美国的 Slatt、Kayenta 和 Kanawha River 三个变电站和巴西的两处。

(1) Slatt 工程<sup>[6][7][8]</sup>是由美国电科院 (EPRI)、通用公司 (GE)、邦纳维尔电力局 (BPA) 以及 PGE (Portland General Electric) 合作于完成的。文中主要讲述了实际工程中的 TCSC 的组成部分,它的基本的运行方式、控制保护系统、各元件的额定参数、实验室的模拟仿真以及现场的试验。这个工程的设计偏重于研究需要,采用了六个模块结构和分级控制,综合了 TCSC 的大部分功能,其控制设计的目标在于如何提高系统的暂态稳定性、阻尼低频振荡和抑制次同步谐振。

(2) 在美国亚利桑那州 Kayenta 变电站的 230kV、165 MVar 的 ASC 工程<sup>[9][10]</sup>是由西门子 (Siemens Energy & Automation) 和美国西部电管局 (Western Area Power Administration) 合作完成的。该串补的主要作用是支持 Kayenta 变电站 230kV 母线的电压,提高该线路的输送能力。在提高输电线的补偿度的同时,利用其良好的动态特性可抑制系统中出现的次同步谐振,将传输功率提高至线路的热稳极限。其研究结果声称,加装该串联补偿后,线路的输送能力由 300MW 提高到 400MW。在这个工程里面,装置采用了一个模块的结构,并以电流控制为主。其研究模型只考虑了稳态模型,以稳态电压电流波形及晶闸管导通情况确定稳态时等效阻抗于晶闸管出发角的关系,未考虑动态模型及动态过程。

(3) 美国电力公司 (AEP) 电力系统在西弗吉尼亚州和弗吉尼亚州之间的南北联络系统共有 2 回 765kV 线路,1 回 345kV 及 6 回 138kV 线路形成电磁环网运行。南部系统共有负荷约 6500MW,而装机容量仅 1766MW。因此,约有 4000MW~5000MW 的功率需经过南北联络系统由电力充足的北部系统送往缺电的南部系统(这与我国西北电力系统西电东送的情况相类似)。从 Baker 到 Broadford 的 765kV 线路一般输送能力为 1800MW~2300MW,最大可达 2600MW。但是,当此线路故障退出运行时,可引起并联运行的 138kV

线路过负荷。同时,并联运行的从 Kanawha River 到 Fund 的 345kV 线路(线路长 174km)由于线路电压损耗和两端相角的限制,最大输送能力为 950MW,而 765kV 线路退出运行后,此线路的输送容量要超过 950MW。为解决上述问题,AEP 与 ABB 公司合作在 Kanawha River 到 Fund 的 345kV 线路上装设了 TCSC。它由三组容抗分别为  $7\Omega$ 、 $14\Omega$  和  $21\Omega$  的电容串联组成。该装置 1991 年 12 月正式投运,容量为 788Mvar,是目前世界上容量最大的串联补偿。工程总造价为 2000 万美元,其中与 TCSC 直接相关的投资为 1200 万美元。该装置的投运改变了稳态潮流分布,提高了线路的输电能力。但也出现了两个问题。一是由于线路电流的升高,使 345kV 线路弧垂超过线路设计标准。最后通过对线路杆塔进行改造解决。二是稳态潮流的改变使全系统网损增加。为降低网损,在不同运行方式下采用不同的补偿度。该工程的最大效益是提高了现有联络线的输送能力,可少建一条 345kV 的输电线路。

(4) 文献[11]介绍了巴西的一个安装在 1020 公里的传输线上的 TCSC 工程项目。在输电线的两端各安装一个模块的 TCSC,每个补偿度为 6%的补偿度,文中详细给出了 TCSC 的控制环节以及控制参数。仿真结果及现场试验结果都表明安装后对系统的低频振荡有明显的改善。文献[12]给出了这个工程所使用 TCSC 的详细模型并用此模型做了 SSR、短路电流限制、线路电流控制等试验。

(5) 文献[13]介绍了澳大利亚 Queensland 到 New South Wales 长距离输电线路的 TCSC 工程。

## b.国内研究现状

我国对 TCSC 的应用研究已在学术界进行了多年。但是在工业应用上进展不快。2003 年 4 月我国第一个 TCSC 实际工程正式在南方电网公司的天生桥到平果的 500kV 输电线路投运。工程的技术报道尚未在公开出版物上发表。

(1) 东北的伊敏到冯屯 500kV 输电线 TCSC 工程<sup>[14]</sup>是国内第一项进入具体实施研究的 TCSC 工程,但是由于某种原因至今没有进入实施阶段。它的出发点是利用 TCSC 增强系统阻尼,提高系统的暂态稳定性,提高输电线的传输功率。围绕此项目所做的研究试验表明在正常的运行范围内,晶闸管触发角跳变时装置达到稳态所需要时间为 40—60 毫秒;任何时刻都可快速切换到小感抗运行方式;容性区域和感性区域可实现过渡。

(2) 阳城到淮阴 500kV 输电线的 TCSC 工程<sup>[15]</sup>也进行了前期研究。该项目是为改输煤为输电而服务的一项工程。从山西的阳城途径河南、山东向江苏淮阴送电,线路全长 760 公里,送电电压为 500 千伏。加装 TCSC 后的补偿度为线路电抗的 40%~60%,正常情况下为 40%。仿真计算表明,TCSC 能够较大幅度地提高这条线路的输电能力,并且对全系统的暂态稳定有明显的效果。

(3) 目前在甘肃省电网 220kV 碧口到成县 220kV 输电线 TCSC 工程已投入运行。

(4) 其它尚在拟议和研究初期的 TCSC 工程还有多处。例如三峡电力系统、福建电力系统的福州到双龙 500kV 输电线路等。美国 EPRI 的 10 年柔性输电(FACTS) R&D 计

划中就包括了 6 个 TCSC 项目；日本已将 TCSC 与 FWG 和 TCPS 并列为加强电网 8 年规划中要采取三项柔性输电（FACTS）技术。

## 1.4 论文的主要工作

本论文所进行的工作和主要研究的内容为：

(1) 通过对 TCSC 的基本结构及运行方式的研究，并且用时域的方法推导 TCSC 的数学模型，得到 TCSC 的基波阻抗。

(2) 通过对三种 TCSC 潮流计算模型的优缺点分析，得到交替迭代算法的含有 TCSC 电力系统潮流计算模型；

(3) 通过对于 TCSC 的阻尼特性的研究以及 TCSC 现有控制技术和稳定计算模型的分析，得到 PID 控制算法的 TCSC 暂态稳定计算模型；

(4) 结合本文所采用的 TCSC 潮流计算模型，考虑到电力系统分析综合程序(PSASP)，采用 FORTRAN 语言进行了含 TCSC 的系统潮流接口程序的编写；

(5) 在一个四机两区域系统内，通过分别对系统线路加装 TCSC 装置前后进行了仿真计算，验证了本文所采用的潮流计算模型和 PID 控制模型的正确性；

(6) 在陕西电网区域系统内，通过对 PID 控制参数分组选择的方式，分别对没有强迫环节和含有强迫环节两种控制模型，搜寻理想的 PID 控制器参数，最终得到最优的控制策略。



## 2 可控串联补偿 (TCSC) 的基本原理

### 2.1 TCSC 的基本结构及工作原理

#### 2.1.1 可控串联补偿简介

串联电容补偿在高压电网里的应用已经有很多年的历史了,它主要用来增强系统的稳定性和系统的载荷能力。它的原理很简单就是通过在线路里产生一个容性电压来补偿线路中的感性电压降落,或者说就是通过电容的加入减小了有效的电气距离。串联电容补偿还有自我调节能力,随着系统负载的增大,线路电流增加,串联电容产生的无功补偿也增加。

可控串联补偿技术(Thyristor Controlled Series Compensation)是在常规固定串联补偿技术的基础上为适应电力系统运行控制的需要而发展起来的。早期的可控串联补偿器采用机械开关投切串联电容器(Mechanically Switched Series Capacitor, 简称 MSSC)来实现,它采用分段投切方式改变对线路阻抗的补偿程度。由于机械开关动作速度较慢,因此,这种补偿装置只主要用于电网潮流控制。随着大功率电力电子器件技术的成熟和发展,出现了利用晶闸管控制的串联补偿技术,包括晶闸管控制串联电容补偿器(Thyristor Controlled Series Capacitor, 简称 TCSC)和晶闸管投切串联电容补偿器(Thyristor Switched Series Capacitor, 简称 TSSC)。与机械开关控制的补偿装置相比,晶闸管控制补偿装置可以实现串联补偿度的快速调节,其性能可以满足电力系统稳定控制和快速潮流控制的需要。与 MSSC 和 TSSC 相比,TCSC 具有阻抗连续可调节的优良性能。因此,该项技术一经提出,就受到了电力工业界和电力系统研究人员的广泛关注。

目前的可控串联补偿装置共分为四类<sup>[16]</sup>:

- (1) TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)晶闸管投切的串联电容器;
- (2) TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)晶闸管控制的串联电容器;
- (3) TSSR(Thyristor Switched Series Reactor)晶闸管投切的串联电抗器;
- (4) TCSR(Thyristor Controlled Series Reactor)晶闸管控制的串联电抗器;

通常所说的以及本文提到的可控串补或 TCSC,指的都是晶闸管控制的串联电容器。

目前的串联补偿有如图 2-1 三种方式:

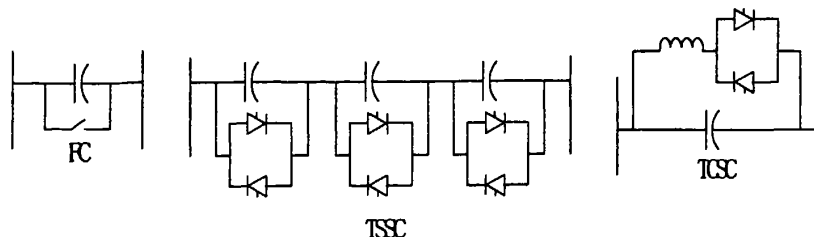


图 2-1 串联补偿的几种不同方式

Fig 2-1 Several different ways of Series compensation

TCSC 通过对电抗器支路晶闸管的快速控制, 改变通过电抗器支路电流的大小, 从而控制 TCSC 的等值电抗的大小, 最终达到改变输电线路总电抗的目的。因此对 TCSC 阻抗特性的研究是 TCSC 的一个重要的基本研究方向。

### 2.1.2 TCSC 的基本结构

TCSC 的典型结构主要由串联电容器 C、晶闸管控制的电抗器  $L_s$  以及作为过电压保护用的旁路断路器 CB 和金属氧化物可变电容器 MOV 组成<sup>[17]</sup>, 如图 2-2 所示。

MOV 是一个非线性电阻器, 跨接在串联电容器上, 用以防止电容器上发生过电压。MOV 不但能限制电容器上的电压, 而且能使电容器保持接入状态, 即使在故障情况下也是如此, 从而有助于提高系统的暂态稳定性。

断路器 CB 跨接在电容器上, 用以控制电容器是否接入线路。另外, 在发生严重故障或设备工作不正常时, CB 就将电容器旁路。电路中还有一个限流电抗器  $L_d$ , 用以限制电容器旁路操作时电容器上电流的大小和频率。

如果要求 TCSC 的阀在“全导通”模式下运行较长时间, 就需要在阀上跨接一个高速接触器 (UHSC), 以使阀上的导通损耗最小。这个金属接触器类似于断路器, 几乎是无损耗的, 并能进行多次投切操作。它在晶闸管阀导通后不久闭合, 而在晶闸管阀关断前的很短时间里断开。在阀突然过载时或在故障情况下, 金属接触器闭合以减轻阀上的应力。

一个完整的 TCSC 系统往往由几个模块串联组成<sup>[4][18]</sup>, 各模块具有独立的触发角, 通过不同模块触发角的组合可使 TCSC 等值阻抗的变化范围更大、调整更平滑。另外, TCSC 还可以与传统的串联电容一起构成整个串联补偿以提高电力系统的性能。

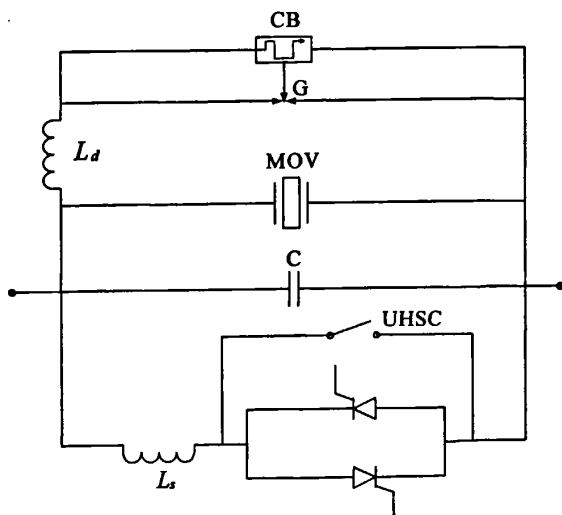


图 2-2 TCSC 的结构图

Fig 2-2 The Structure of TCSC

### 2.1.3 TCSC 的触发方式

TCSC 的触发控制方式与 HVDC 有相似之处。按触发原理可分为采用分相控制（固定触发角）方式和等间隔触发方式，它们的动态性能是不同的。分相控制按所选的基准时间不同，又分为采用线路电流过零和电容电压过零时刻作为基准两种控制方式。文[19]通过仿真分析比较了在分相控制方式及等间隔触发方式下不同的动态特性，与固定触发角的分相方式相比，等间隔触发控制能够提高系统的动态性能，减少过冲。文[20]分析了 TCSC 触发角控制方式对电力系统暂态特性的影响，仿真结果表明：采用电容电压过零时刻为基准的触发控制方式比以线路电流过零时刻为基准的控制方式具有更好的阻尼系统振荡性能。

本文采用分相控制方式。对 TCSC 回路进行数学分析时以电容电压过零点作为晶闸管触发角的参考点，晶闸管在电容支路的电流与电压极性相反的时候触发，这样才能在 TCSC 回路中形成环流达到增加等效阻抗的目的，环流随着触发角的减小（从  $180^\circ$ ）而增大。

### 2.1.4 TCSC 的工作原理

TCSC 的工作原理与具有可变电抗的并联 LC 电路相似。通过对触发脉冲的控制改变晶闸管的触发角，即可改变由其控制的电感支路的电流大小，因而可连续改变总等效电抗。TCSC 在一定的感性和容性范围内工作，其工作范围受晶闸管触发角、MOV 保护条件及电容额定电流的限制，在运行过程中，这些限制条件会影响控制方式的实施。

TCSC 模块有三种基本运行模式<sup>[21]</sup>：全关断模式、旁路模式和微调模式。

在全关断模式时，晶闸管门极没有触发信号，晶闸管开关一直不导通，触发角等于  $180^\circ$ ，整个模块阻抗就等于电容器的阻抗。

在旁路模式时，晶闸管门极连续触发，晶闸管开关全导通，触发角等于  $90^\circ$  由于晶闸管支路中电抗的存在，模块呈小感抗性质。在 TCSC 的应用中还存在一种“断路器旁路”模式，它是指跨接在 TCSC 上的断路器闭合时的情形。这两种旁路模式是性质和功能不同的模式，前者是用来线路控制且和线路保护相关，后者是用来在线路中切除 TCSC 或因为 TCSC 内部故障而采取的保护动作。

在微调模式时，晶闸管门极触发信号采用相控，晶闸管开关处于部分导通状态，触发角介于  $90^\circ$  和  $180^\circ$  之间。整个模块的性质取决于晶闸管的导通程度，当晶闸管导通程度较低时，模块呈容性；当晶闸管导通程度较高时，模块呈感性。

### 2.1.5 TCSC 在系统中的安装位置

将 TCSC 装置安装在合适的位置是一个关键的问题。当 TCSC 装置安装在最优位置时，为达到同样的控制目标所需要的容量比安装在其它位置要小。但是，有时候 TCSC 装置需要安装在非最优的位置以减小成本，特别是在土地价格和环境影响很重要时。

一般来说，TCSC 的安装位置应满足如下几个条件<sup>[17]</sup>：

- (1) TCSC 应该安装在对功率振荡起决定性作用的线路上。
- (2) TCSC 两侧的电压振荡必须在可接受的范围内。
- (3) 在一条输电通道上, TCSC 的控制作用应该不会引起并联通道上不当的功率振荡。
- (4) 有时, 需要将控制作用分散到多个 TCSC 装置上, 而不是将控制作用集中在一个大容量的 TCSC 上。这样做, 可以在一个 TCSC 失效时, 仍然保证系统的稳定性。

## 2.2 TCSC 的特性分析

### 2.2.1 TCSC 的基波等值阻抗分析

由于 TCSC 式串联在线路里的, 考虑到谐波管理等方面的因素, 认为通过 TCSC 的电流即线路电流, 其波形为正弦。稳态时电容电压应该是非正弦的, 这里主要是为了表明其相位关系, 用正弦电压模拟, 实际中电容电压也主要是基波成分[2]。其触发波形图如下图 2-3 所示, 其中  $i$  表示交流线上流过的电流,  $v_c$  表示电容上的电压,  $i_v$  表示晶闸管流过的电流,  $\alpha$  表示触发角,  $2\beta$  表示导通角。

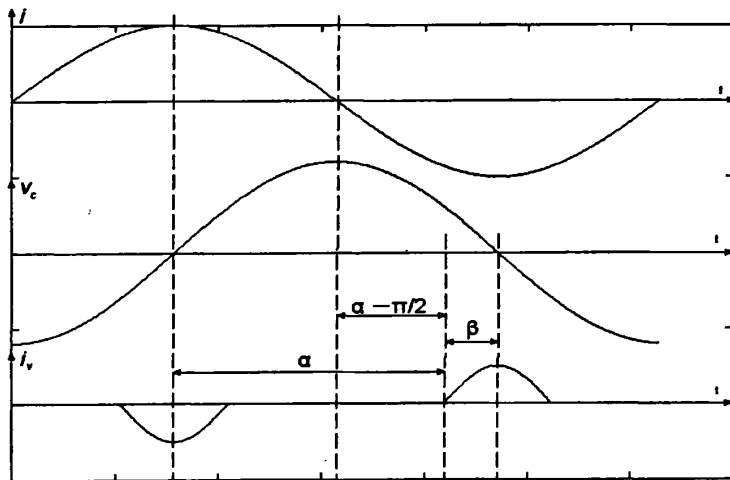


图 2-3 TCSC 触发示意图

Fig 2-3 The triggering schematic curves of TCSC

以下应用时域的方法推导 TCSC 的基波阻抗。

当晶闸管开通时, 有以下方程式:

$$\begin{cases} i_c = C \frac{dv_c}{dt} \\ v_c = L \frac{di_v}{dt} \\ i_c + i_v = i = I_m \sin \omega t \end{cases}$$

对其进行求解有:

$$LC \frac{di_v^2}{dt^2} + i_v = I_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$\frac{di_v^2}{dt^2} + \omega_0^2 i_v = \omega_0^2 I_m \sin \omega t, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

其中：齐次通解为： $i_v^\Delta = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t$

设特解为： $i_v' = G \cos \omega t + D \sin \omega t$

代入求解得： $G = 0, D = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} I_m, \lambda = \frac{\omega_0}{\omega}$

即： $i_v = A \cos \lambda \omega t + B \sin \lambda \omega t + D \sin \omega t$

接下来对  $A$ 、 $B$  进行求解。

在图 2-3 中，应用当  $\omega t = \alpha - \frac{\pi}{2}$  和  $\omega t = \frac{3\pi}{2} - \alpha$  时  $i_v = 0$  代入 (2.1) 式可得到：

$$A = \frac{D \cos \alpha}{\cos \lambda \beta} \cos \frac{\lambda}{2} \pi, B = \frac{D \cos \alpha}{\cos \lambda \beta} \sin \frac{\lambda}{2} \pi, \beta = \pi - \alpha$$

$$\text{故 } i_v = D \left[ \sin \omega t + \frac{\cos \alpha}{\cos \lambda \beta} \cos \frac{\lambda}{2} \pi \cos \lambda \omega t + \frac{\cos \alpha}{\cos \lambda \beta} \sin \frac{\lambda}{2} \pi \sin \lambda \omega t \right] \quad (2.2)$$

$$v_c = L \frac{di_v}{dt} = DL \left[ \omega \cos \omega t + \frac{\cos \alpha}{\cos \lambda \beta} \omega_0 \sin \left( \frac{\lambda}{2} \pi - \lambda \omega t \right) \right] \quad (2.3)$$

当晶闸管关断时，有以下方程式：

$$C \frac{dv_c}{dt} = i = I_m \sin \omega t$$

$$\text{解之得到： } v_c = E - \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t \quad (2.4)$$

当  $\omega t = \alpha - \frac{\pi}{2}$  时，由图 2-3 可知，由式 (2.3) 和 (2.4) 式计算出的  $v_c$  应该相等，根据这个条件求得：

$$E = DL(\omega \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha \tan \lambda \beta) + \frac{I_m}{\omega C} \sin \alpha$$

$$\text{此时的电容电压为： } v_c = V_0 + \frac{I_m}{\omega C} \sin \alpha - \frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t \quad (2.5)$$

其中： $V_0 = DL(\omega \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha \tan \lambda \beta)$

由图 2-3 可看出电容电压为一偶函数，所以有如下傅氏积分求得基波电压：

$$\begin{aligned}
 v_1 &= \frac{2}{\pi} \int_{\alpha-\frac{\pi}{2}}^{\alpha-\frac{\pi}{2}} \left[ DL(\omega \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha \operatorname{tg} \lambda \beta) + \frac{I_m}{\omega C} \sin \alpha - \frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t \right] \cos \omega t d\omega t + \\
 &\int_{\alpha-\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}-\alpha} DL \left( \omega \cos \omega t + \frac{\cos \alpha}{\cos \lambda \beta} \omega_0 \sin \left( \frac{\lambda \pi}{2} - \lambda \omega t \right) \right) \cos \omega t d\omega t + \\
 &\int_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha} \left[ DL(\omega \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha \operatorname{tg} \lambda \beta) + \frac{I_m}{\omega C} \sin \alpha - \frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t \right] \cos \omega t d\omega t \quad (2.6) \\
 &= \frac{4}{\pi} \left[ -DL(\omega \sin \alpha + \omega_0 \cos \alpha \operatorname{tg} \lambda \beta) \cos \alpha - \frac{I_m}{\omega C} (2\alpha - \pi + \sin 2\alpha) \right] + \\
 &\frac{2}{\pi} DL \left[ \omega \beta + \frac{\omega \sin 2\alpha}{2} - \frac{2\omega_0}{\lambda^2 - 1} (\lambda \cos \alpha \sin \alpha + \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \lambda \beta) \right]
 \end{aligned}$$

最后推出结果： $X_{TCSC} = \frac{V_1}{I_m} = K_\beta X_C$  (2.7)

$$K_\beta = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \left[ \frac{2 \cos^2 \beta}{\lambda^2 - 1} (\lambda \operatorname{tg} \lambda \beta - \operatorname{tg} \beta) - \beta - \frac{\sin \beta}{2} \right] \quad (2.8)$$

依照上式可画出  $K_\beta \rightarrow \beta$  的关系曲线如图 2-4，此图中取  $\lambda = 3$ 。从图 2-4 中可以看出，当  $\lambda\beta = \pi/2$  时， $K_\beta$  等于无穷大，即 TCSC 的基频谐振点。解之得到触发角  $\alpha = \pi \left( 1 - \frac{\omega}{2} \sqrt{LC} \right)$  即  $\lambda\beta = \pi/2$ 。为防止在 TCSC 两端产生谐振过电压，禁止  $\beta$  在  $\pi/2\lambda$  附近运行。

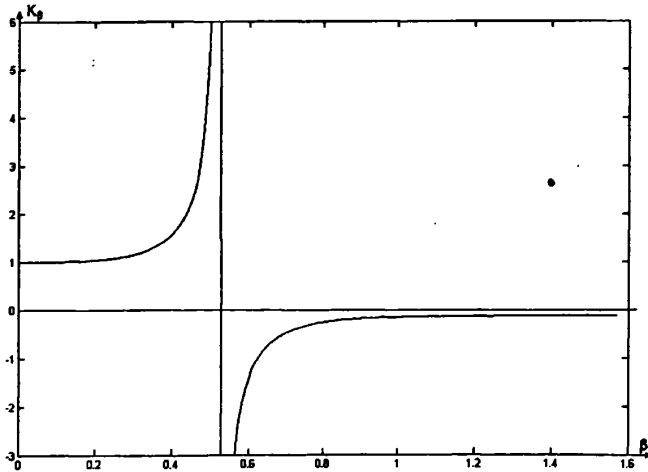


图 2-4 理论上导通角与放大倍数的关系

Fig 2-4 The Relations of Breakover angle and Enlargement factor

$X_{TCSC} = K_\beta X_C$ ，从理论上来说无论是感性区域还是容性区域的补偿度都 以达到任意大。

### 2.2.2 TCSC 的阻尼特性分析

接下来分析阻尼一个系统机电振荡所需的控制信号，为了便于分析，以图 2-5 所示的单机无穷大系统为例来进行研究<sup>[22]</sup>。

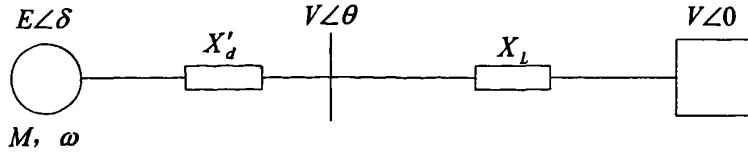


图 2-5 单机无穷大系统

Fig 2-5 Single plane Infinite large-scale system

这里假定系统有恒定的机械功率输入，系统的微分方程如下：

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \Delta \omega \\ M \Delta \dot{\omega} = -\frac{VE}{X_{\Sigma}} \cos \delta_0 \Delta \delta \end{cases} \quad \text{其中: } X_{\Sigma} = X'_d + X_L$$

$$\text{则特征矩阵: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{VE}{MX_{\Sigma}} \cos \delta_0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{求得其特征值为: } \lambda = \pm \sqrt{-\frac{VE}{MX_{\Sigma}} \cos \delta_0}$$

可以看出，当  $\cos \delta_0 > 0$ ， $X_{\Sigma} > 0$  时，系统是等幅振荡模式，这是由于阻尼转矩（异步转矩）不足造成的。为了使系统避免发生这种情况，需要有额外的调节功率加入，以阻尼系统的振荡，假设所加入的调节功率如下：

$$\Delta P = K_{\omega} \Delta \omega + K_{\delta} \Delta \delta \quad (2.9)$$

$$\text{此时的微分方程变为: } \begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \Delta \omega \\ \Delta \dot{\omega} = \frac{1}{M} [K_{\omega} \Delta \omega + (K_{\delta} - K_S) \Delta \delta] \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\text{其中: } K_S = \frac{VE}{X_{\Sigma}} \cos \delta_0$$

$$\text{故: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{K_{\delta} - K_S}{M} & \frac{K_{\omega}}{M} \end{bmatrix}$$

$$\text{其特征值为: } \lambda = \frac{K_{\omega}}{2M} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{K_{\omega}}{M}\right)^2 - 4 \frac{K_{\delta} - K_S}{M}} \quad (2.11)$$

可以看出如果  $K_{\omega} > 0$  系统振荡，表明阻尼转矩不足，可以看出  $\Delta \omega$  的系数影响到系统的稳定，而  $\Delta \delta$  的系数只影响到系统的振荡频率，也就是说只影响同步转矩。为了引入异步转矩，这里引入 TCSC 以改变  $X_{\Sigma}$  使它为  $\omega$  的函数。假设引入后的系统如图 2-6 所示。

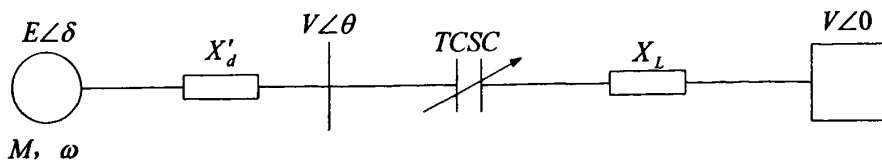


图 2-6 加入 TCSC 的后单机无穷大系统

Fig 2-6 Single plane Infinite large-scale system with TCSC

$$\text{令: } \Delta X_C = K_C \Delta \omega$$

$$\text{可以得到: } \Delta P_E = \frac{VE}{X_{\Sigma 0}} \cos \delta_0 \Delta \delta + \frac{VE}{X_{\Sigma 0}^2} \sin \delta_0 K_C \Delta \omega \quad (2.12)$$

$$\text{其中: } X_{\Sigma 0} = X'_d + X_L - X_{TCSC}$$

$$\text{则: } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{VE}{MX_{\Sigma 0}^2} \cos \delta_0 & -\frac{VE}{MX_{\Sigma 0}^2} \sin \delta_0 K_C \end{bmatrix}$$

$$\text{特征值为: } \lambda = -\frac{VE}{MX_{\Sigma 0}^2} K_C \sin \delta_0 \pm \sqrt{\left( \frac{VE}{MX_{\Sigma 0}^2} K_C \sin \delta_0 \right)^2 - 4 \frac{VE}{MX_{\Sigma 0}^2} \cos \delta_0}$$

从上面得以结论:

(1) TCSC 可以阻尼系统的机电振荡。即当  $\Delta \omega$  增大时,  $\Delta X_C$  增大, 导致上式实部绝对值增大, 最终使系统阻尼增强。

(2) 阻尼的效果随着负载的增加而增强。即负载增大  $\delta$  增大,  $\sin \delta$  增大导致 TCSC 的阻尼特性增强。

### 2.2.3 TCSC 提高电力系统稳定水平的机理分析<sup>[23]</sup>

#### a. 影响交流输电线路的输送能力的因素

输送能力是指输送线路在满足电能质量、系统的稳定性及经济性等工作条件下, 输电线送电端允许通过的有功容量值, 即线路的输电容量。导线允许发热、线路允许电压降及满足电力系统运行的经济性与稳定性, 是影响输送能力的主要因素。应对输电线路进行多项校验计算以确定允许的输电能力。对于具体线路可能是其中某一因素是确定约束条件, 例如对于输送距离较短的线路, 由导线允许持续发热条件确定其输电能力, 对于向某一负荷点供电的输电线路, 线路允许电压降常起决定性制约性因素, 对于长距离、重负荷的超高压输电线路, 保持系统稳定性往往是主要的制约条件, 有的线路可能按经济电流密度采用经济输送容量。

上述影响输送能力的要素不仅与输电线路本身的技术条件(如电压等级、线路结构、导线材料及截面、线路回路与长度等)有关, 也与输电线路所在电力系统的具体条件如电网结构、运行方式、继电保护和控制技术等有关。例如: 从大电源向电力网输电的线路, 其输送功率与大电源占系统容量大小相适应; 高低压电磁环网可能限制线路输送能力; 而



继电保护快速切除故障或辅以可靠的安全自动装置等措施可以提高系统的稳定性,从而提高线路的输送能力。

### b.提高输电线路输电能力的措施

提高输电线路输电能力主要是提高电力系统稳定水平,包括提高静态稳定和暂态稳定水平。提高静态稳定水平主要是加强电网联系,减小送、受端的联系电抗,提高运行电压;提高暂态稳定水平的措施,除增加系统承受扰动能力外,还必须减少扰动量及缩短扰动时间。提高稳定的具体措施主要有:

(1) 电压的提高和控制方面:主要有采用快速励磁调节、中间并联补偿等;

(2) 减少电源间联系电抗方面:主要有采用串联电容补偿、采用分裂导线及紧凑型输电、加强电网主网架建设等;

(3) 减少扰动量及多端扰动时间方面:主要有设置中间开关站、连锁切机及火电机组快速关闭进汽门、快速切除故障和自动重合闸等;

(4) 其他方面:如采用灵活交流输电技术等。

### c.串联补偿装置提高系统稳定输送容量的基本原理

图 2-7 给出了一个简单的输电系统,一台发电机通过一条输电线路与无穷大系统相连。图中,  $V_S$  表示电源端电压的幅值和相位;  $V_R$  表示无穷大系统的电压和相位;  $Z$  表示输电线路的线路阻抗,其中发电机的电抗已合并到了输电线路中。

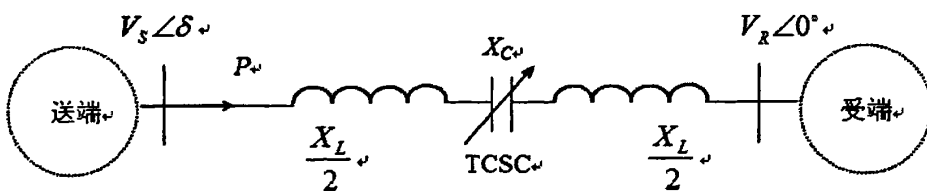


图 2-7 装有 TCSC 的系统示意图

Fig 2-7 Electric power system with TCSC

$$\text{显见系统输送功率为: } P = \frac{V_S V_R}{X_L + X_C} \sin \delta \quad (2.13)$$

区别于传统的串联补偿,这里的电抗  $X_C$  可以动态地调整,因而相当于输电线的电气距离  $X_L + X_C$  可以动态地调整。在稳态情况下,当  $X_C$  为容性时,静稳极限大于无串补时的情况。

显然,当  $\delta$  角取  $90^\circ$  时输送容量达到极限,根据输电线路的极限输送容量可知,提高电压水平和降低输电线路的电抗都可以增加输电线路的提高极限输送容量。

可控串补 (TCSC) 通过在输电线路中串入容性电抗来降低线路的感性电抗以达到降低电抗的目的。根据极限输送容量公式可知, 如果电抗是原电抗的  $1/2$  则极限输送容量可以提高到原来的 2 倍; 再进一步降低电抗, 则极限输送容量会再提高。而随着电抗的减小, 所要补偿的容性电抗容量就会增加很多, 因此在达到了提高输送容量的基础上需合理选择补偿装置的容量。

### 3 含 TCSC 的电力系统潮流计算模型

电力系统潮流计算是电力系统分析的基础工作。因此,每当一种新型元件被引入电力系统后,首先要解决的问题就是如何计算电力系统的潮流。在 FACTS 潮流建模方面已有较多的研究<sup>[24-30]</sup>,通常对这类控制器采取注入功率的方法来建立模型。文 [24] 首先将它们归结为两类控制(串联控制和并联控制)的组合,然后结合其变量的特点来建立相应的模型。进一步的研究还指出<sup>[25-27]</sup>,模型变量的处理,应分为预给定变量和固定控制目标两种方式,后者可能更接近于工程实际。但是,如何将这些潮流模型与传统潮流程序结合尚需进一步工作。中国电力科学研究院的电力系统分析综合程序(PSASP)是用于电力系统分析的得力工具。新版的 PSASP6.0 基于视窗界面,在继承以往功能的情况下又吸收了图形化的特点,大大提高了与用户的交互性<sup>[31]</sup>。

本章将讨论 TCSC 加入电力系统后的三种潮流计算模型。其中前两种是与现行通用潮流计算程序相结合的方法,而后一种是与本文论文仿真计算所用的 PSASP 软件包相结合的方法。

可控串补在电力系统潮流分析中的研究目的主要有:

(1) 研究可控串补对电力系统稳态运行工况的影响,如对线路潮流、母线电压控制的影响;

(2) 根据可控串补的运行目标来确定它的运行方式和要求的容量。

在电力系统潮流计算中,可控串补通常用简化的功能模块来模拟,一般用串联的可变阻抗来表示。含有可控串补的电力系统潮流计算是一个非线性优化问题,理论上可以采用相应目标的最优潮流算法求解。但是,串补元件仅能控制系统局部变量,如某一节点的电压、某一线路的功率等,因此,实际上常采用一些实用的简化计算方法。

在潮流分析中,可以通过改变 TCSC 的阻抗实现对线路功率或者某一母线电压的控制,它采用的是稳态模型。在潮流计算的迭代过程中,可以根据控制目标的给定量和当前计算量的偏差调整 TCSC 的电抗,到偏差为零为止。根据不同的控制目标,可以有不同的控制模型。图 3-1 是一种简单的 TCSC 有功功率控制模型示意图,它的目标是维持线路的功率为给定值。

#### 3.1 含 TCSC 的电力系统潮流计算模型之一<sup>[32]</sup>

这种模型考虑在系统中增加两个节点(TCSC 的两个端点),同时增加一个支路(TCSC),并引入状态变量 $\alpha$ (晶闸管触发角),且增加相应的方程式来求解系统潮流。假设电力系统中加入如图 3-1 所示模块。

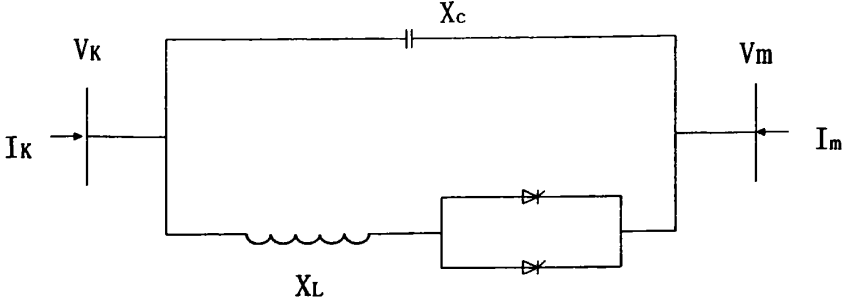


图 3-1 潮流计算中加入网络 TCSC 模块

Fig 3-1 Model of TCSC device in power flow calculation

考虑增加  $k$  节点雅可比矩阵的变化。对于  $m$  节点只要将  $k$  节点的结果中的  $k$  换成  $m$  即可。假设注入节点  $k$ 、 $m$  的电流为  $I_k$ ， $I_m$  节点电压为  $V_k$ 、 $V_m$ ，TCSC 模块的导纳矩阵为：

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jB_{kk} & jB_{km} \\ jB_{mk} & jB_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\text{其中： } B_{kk} = B_{mm} = -B_{TCSC} = \frac{1}{X_{TCSC}}$$

其中，TCSC 的基波等值电抗  $X_{TCSC}$  为(2.7)所表达，将  $\beta = \pi - \alpha$  代入(2.7)，将  $X_{TCSC}$  表达为触发角  $\alpha$  的函数。

TCSC 注入节点  $k$  的功率为：

$$P_k = -V_k V_m B_{TCSC} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (3.2)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{TCSC} + V_k V_m B_{TCSC} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (3.3)$$

支路  $V_k$  上流动的有功为：

$$P_{km} = -V_k V_m B_{TCSC} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \alpha} = P_k B_{TCSC} \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} = Q_k B_{TCSC} \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha} \quad (3.6)$$

$$\text{其中： } \frac{\partial B_{TCSC}}{\partial \alpha} = B_{TCSC}^2 \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha} = & -2C_1(1 + \cos 2\alpha) + C_2 \sin(2\alpha)(\lambda \tan(\lambda(\pi - \alpha)) - \tan \alpha) \\ & + C_2 \left[ \lambda^2 \frac{\cos^2(\pi - \alpha)}{\cos^2(\lambda^2(\pi - \alpha))} - 1 \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

其中：

$$\begin{cases} X_{LC} = \frac{X_c X_L}{X_c + X_L} \\ C_1 = \frac{X_{LC} - X_c}{\pi} \\ C_2 = \frac{4X_{LC}^2}{\pi X_L} \end{cases} \quad (3.9)$$

TCSC 支路的线性化方程为：

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{km} \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial P_{km}^\alpha}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}^\alpha}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}^\alpha}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{km}^\alpha}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{km}^\alpha}{\partial \alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \Delta \alpha \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

所以对 TCSC 支路可以作如下处理：将 (3.10) 式所表示的矩阵加入到系统的 Jacobi 矩阵中进行计算。其中，上标  $i$  表示迭代次数， $\Delta P_{km} = P_L - P_{km}^\alpha$ ， $\Delta \alpha = \Delta \alpha_{i+1} - \Delta \alpha_i$  分别表示迭代过程中 TCSC 支路的有功不匹配量和 TCSC 触发角的增量， $P_c$  表示线路的控制功率。

### 3.2 含 TCSC 的电力系统潮流计算模型之二<sup>[33]</sup>

在这种潮流计算模型中，将 TCSC 看作可控阻抗  $X_{TCSC}$ 。文献[31]提出了一种与传统牛顿法相结合的算法。本文对其做了少许改进，使计算更加简捷。不失一般性，设在线路  $l-m$  中靠近节点  $l$  端装有 TCSC，如图 3-2 所示。与线路  $l-m$  中不串联 TCSC 的系统相比，增加了节点  $P$ 。由图不难导出与 TCSC 无关的节点功率平衡方程为：

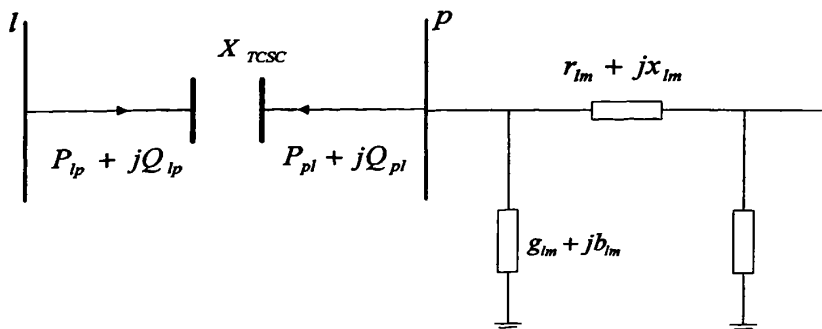


图 3-2 含 TCSC 的网络示意图

Fig 3-2 Equivalent diagram of line including TCSC

$$\Delta P_i = P_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3.11)$$

$$\Delta Q_i = Q_{is} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3.12)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n; i \neq l, p)$$

$$\Delta P_l = P_{ls} - P_c - V_l \sum_{j \neq p} V_j (G_{lj} \cos \theta_{lj} + B_{lj} \sin \theta_{lj}) = 0 \quad (3.13)$$

$$\Delta Q_l = Q_{ls} - \frac{V_l}{X_{TCSC}} (V_l - V_p \cos \theta_{lp}) - V_l \sum_{j \neq p} V_j (G_{lj} \sin \theta_{lj} - B_{lj} \cos \theta_{lj}) = 0 \quad (3.14)$$

$$\Delta P_p = P_c - V_p \sum_{j \neq l} V_j (G_{pj} \cos \theta_{pj} + B_{pj} \sin \theta_{pj}) = 0 \quad (3.15)$$

$$\Delta Q_p = \frac{V_p}{X_{TCSC}} (V_l - V_l \cos \theta_{lp}) - V_p \sum_{j \neq l} V_j (G_{pj} \sin \theta_{pj} - B_{pj} \cos \theta_{pj}) = 0 \quad (3.16)$$

由于未知数  $X_{TCSC}$  而增补的方程:

$$\Delta P_p = P_c - \frac{V_l V_p}{X_{TCSC}} \sin \theta_{lp} = 0 \quad (3.17)$$

式中  $V$  和  $\theta$  为节点电压幅值与相角;  $\theta_{lp} = \theta_l - \theta_p$  为节点  $l$  与  $P$  的电压相角差;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$

为网络导纳矩阵的元素。  $P_c$  为由 TCSC 控制的线路有功功率定值。式 (3.11) ~ (3.16)

共同组成了含 TCSC 的潮流计算方程式。与不含 TCSC 的潮流计算相比仅仅是增加了一个未知控制变量  $X_{TCSC}$ , 同时, 方程中增加了控制目标方程 (3.17)。因而雅可比矩阵的生成过程基本没有改变, 只是增加了一行一列。注意到  $X_{TCSC}$  只出现在节点  $l$  和节点  $P$  的无

功方程及控制目标方程中, 因此, 雅可比矩阵新增的一列中只有 3 个非零元, 即:  $\frac{\partial \Delta Q_l}{\partial X_{TCSC}}$ 、

$\frac{\partial \Delta Q_p}{\partial X_{TCSC}}$ 、 $\frac{\partial \Delta P_p}{\partial X_{TCSC}}$ ; 新增的一行中除去  $\frac{\partial \Delta P_p}{\partial X_{TCSC}}$  外还有 4 个非零元:  $\frac{\Delta P_p}{\partial V_l} V_l$ 、 $\frac{\Delta P_p}{\partial V_p} V_l$ 、 $\frac{\Delta P_p}{\partial Q_l}$ 、 $\frac{\Delta P_p}{\partial Q_p}$ 。

其他元素与传统潮流计算的生成方法完全一致。上边的算法是以  $X_{TCSC}$  为控制变量的。潮流方程获解后, 可由 (2.4) 求解出导通角  $\beta$ 。

### 3.3 基于交替迭代法的含 TCSC 潮流计算模型

所用模型与文[34]思想相同, 只是在迭代求解  $\Delta U$  时, 认为  $\Delta U = 0$ , 即对此非线性方程组进行解耦。

系统数学模型如下:

$$\begin{cases} F(X, U) = 0 \\ G(X, U) = 0 \end{cases} \quad (3.18)$$

其中:

$F = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$  为网络平衡方程;

$G = (g_1, g_2, \dots, g_n)^T$  为被控线路有功功率平衡方程;

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  线路有功功率平衡函数为母线电压的实部和虚部;

$U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  为被控线路电抗  $X$ 。

设线路两侧的支路的号为  $i$  和  $k$ ，线路阻抗为  $r_l + jx_l$ ，线路两侧端电压分别为  $V_i = e_i + jf_i$  和  $V_k = e_k + jf_k$ 。该线路的有功功率可表示为：

$$P_{ik} = \text{Re} \left( \hat{V}_i \hat{I}_{ik} \right) = \text{Re} \left[ \frac{\hat{V}_i (\hat{V}_i - \hat{V}_k)}{r_l - jx_l} \right] = \frac{V_i^2 r_l}{r_l^2 + x_l^2} - \frac{(e_i e_k + f_i f_k) r_l}{r_l^2 + x_l^2} + \frac{(f_i e_k - e_i f_k) x_l}{r_l^2 + x_l^2}$$

$$= P_{ik}(e_i, f_i, e_k, f_k, r_l, x_l) \quad (3.19)$$

故被控线路有功功率平衡方程式可简写如下：

$$P_{ik}^0 = P_{ik}(e_i, f_i, e_k, f_k, r_l, x_l) \quad (3.20)$$

其中  $P_{ik}^0$  为指定有功功率值，即：

$$g_l = P_{ik}^0 - P_{ik}(e_i, f_i, e_k, f_k, r_l, x_l) = 0$$

$$u_l = x_l \quad (l = 1, 2, \dots, m) \quad (3.21)$$

首先应用牛顿拉夫逊法求解 TCSC 潮流。

$$\text{对于} \begin{cases} F(X, U) = 0 \\ G(X, U) = 0 \end{cases}$$

其牛顿法迭代公式为：

$$\begin{cases} F'_X \Delta X' + F'_U \Delta U' = -F(X', U') \\ G'_X \Delta X' + G'_U \Delta U' = -G(X', U') \\ X^{t+1} = X' + \Delta X' \\ U^{t+1} = U' + \Delta U' \end{cases} \quad (3.22)$$

实际应用时是交替求解上式的，即对  $U$  和  $X$  进行解耦，具体如下图 3-3 所示：

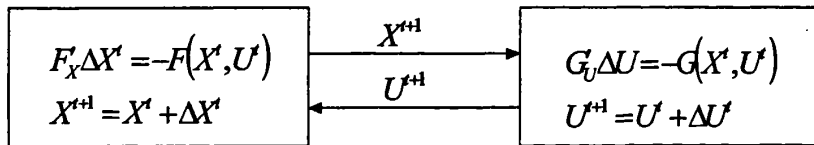


图 3-3 实际潮流的求解过程

Fig 3-3 The actual current solves process

直到满足： $\|\Delta X_i\| < \varepsilon_1$  和  $\|\Delta U_i\| < \varepsilon_2$

其次是被控线路有功功率平衡的修正方程。

图 3-3 中后边一块为控制变量  $U$  的修正方程，其中：

$$G'_U = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \frac{\partial g_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_m} \\ \frac{\partial g_2}{\partial u_1} & \frac{\partial g_2}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial u_m} \\ \vdots & & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \frac{\partial g_m}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_m} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

为修正方程系数矩阵。若忽略其它线路电抗  $X$  对本线路功率的影响，且忽略电阻，令  $r=0$ ，则：

$$\frac{\partial g_i}{\partial u_j} = 0 \quad (i \neq j) \quad (3.24)$$

$$-\frac{\partial g_i}{\partial u_i} = \frac{e_i f_k - e_k f_i}{x_i^2} \quad (3.25)$$

因此  $G'_u$  是一对角阵，原修正方程式

$$G'_u \Delta U^l = -G(X^{l+1}, U^l) \quad (3.26)$$

$$\text{变为: } -\frac{\partial g_l}{\partial u_l} \Delta u_l = g_l(e_i, f_i, \dots) \quad (l=1, 2, \dots, m) \quad (3.27)$$

$$\text{即: } \begin{cases} \frac{e_i f_k - f_i e_k}{x_i^2} \Delta x_i' = P_{ik}^0 - P_{ik}(e_i, f_i, e_k, f_k, r_i, x_i') \\ x_i^{l+1} = x_i' + \Delta x_i' \end{cases} \quad (3.28)$$

即按给定的线路潮流，求出指定线路电抗的修正量。

### 3.4 几种潮流计算方法的简单比较

第一种方法直接以触发角  $\alpha$  为控制变量，在计算时比较直接方便，第二和第三种还要考虑到后续有  $X_{order}$  到  $\alpha$  之间的迭代过程，在这里做仿真研究 TCSC 对陕西电网的影响做先期仿真，这里考虑到  $X_{order}$  要与中国电科院的 PSASP 仿真程序接口的原故，因此本文选择第三种求解方法。其传递函数框图如图 3-4 所示，并且采用 FORTRAN 对潮流程序进行编写。

### 3.5 潮流计算一些注意事项

#### 3.5.1 潮流计算的初值问题<sup>[32]</sup>

不好的初值常常导致潮流的不收敛或者收敛到反常的数值，因此，各节点电压的幅值一般都选为 1（标幺值），相角都选为  $0^\circ$ ，所以在第一次迭代过程中要将 TCSC 看成固定阻抗，在以后的迭代过程中，TCSC 两端的相角差就可以保证以上模型的使用，对于第一种模型经常选定的  $\alpha$  初值是距离谐振点  $\pm 8^\circ$  处。

#### 3.5.2 截短调节 (Truncated adjustments)<sup>[33]</sup>

牛顿拉夫逊法没有直接考虑到状态变量的越界问题，如果  $\Delta\alpha$  或者  $\Delta X$  有比较大的增量在回代过程中  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  会产生较大的偏差，最终导致很差的收敛性更或者不敛这种情况可以通过在回代过程中限制  $\Delta\alpha$  或者  $\Delta X$  的数量来解决。通常若  $|\Delta\alpha| > 5^\circ$  则用  $5^\circ$  来代替， $|\Delta X| > 0.1$  则用 0.1pu 来代替。



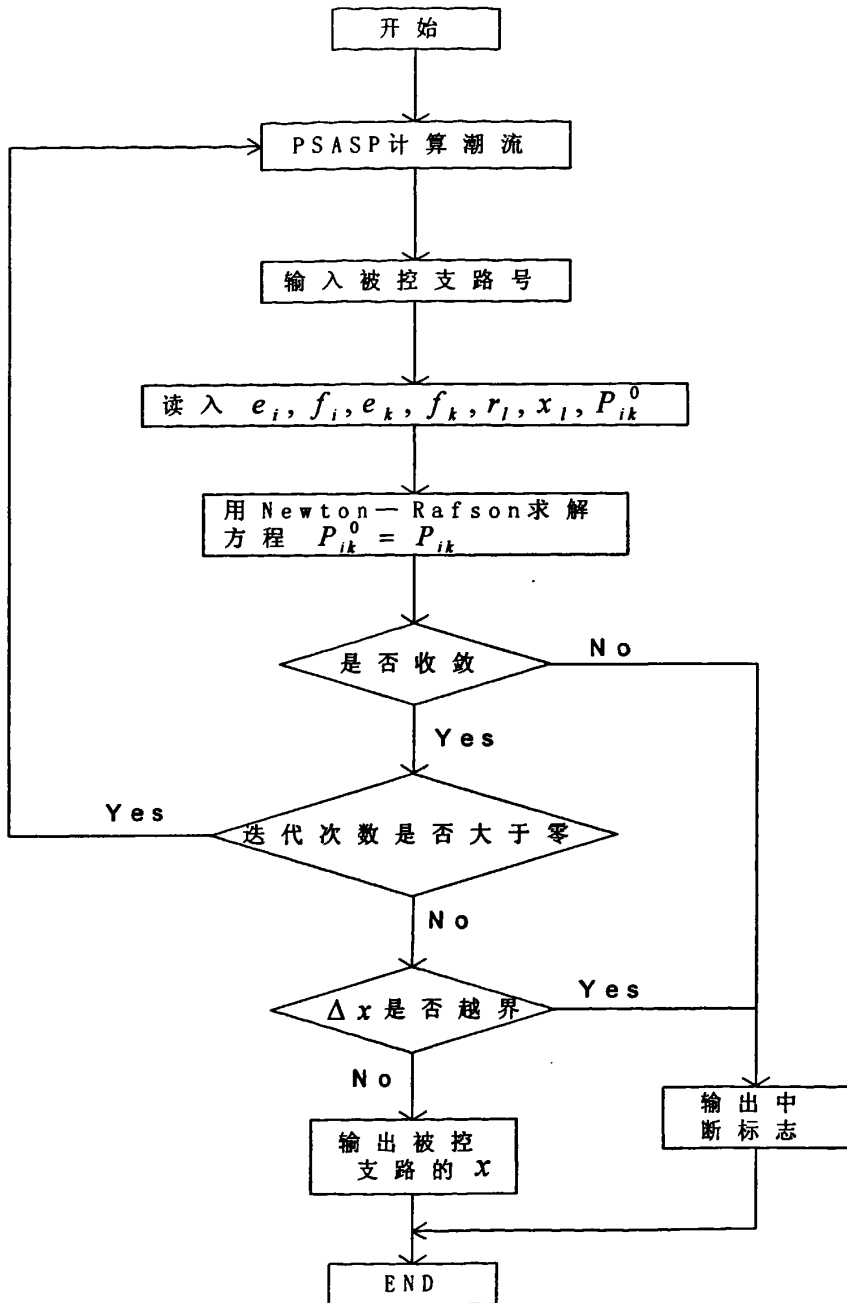


图 3-4 加入 TCSC 后的电力系统潮流计算流程

Fig 3-4 the current calculation process of the electric power system with TCSC

## 4 TCSC 在稳定计算中的模型

### 4.1 TCSC 的稳定控制模型综述<sup>[34]</sup>

可控串补的控制器根据不同的控制目标来设计。稳定控制有两个目标：一个是在电力系统受到大干扰后，使同步发电机在第一或第二振荡周期不失步；另一个就是在电力系统发生振荡时，增加对振荡的阻尼。所以对 TCSC 的稳定控制器的理论研究也因此分为两种：阻尼系统振荡型和暂态稳定控制型。

#### 4.1.1 阻尼系统振荡类型

(1) 成本函数理论用来研究对不同系统在不同负载情况下的参数选择<sup>[35]</sup>。

(2)  $H^\infty$ 理论的应用。其中文[36]应用直接反馈线性化和  $H^\infty$ 控制理论，设计了一种多机系统 TCSC 多目标  $H^\infty$ 控制器，该控制器中的变量均为局部可测量，从而具有很强的适用性。文[37]是非线性多目标  $H^\infty$ 可控串补的控制器的设计思想，除了具有以上控制器的优点外，还能更好得反映电力系统的动态特性。

(3) 应用特征值分析理论[38]和极点配置理论[39]来优化 TCSC 控制器的参数配置。

(4) 应用线性优化控制理论里面的 LQR(Linear-quadratic regulator)技术来优化控制环节的增益。它的应用见文[40]。

(5) PID 控制器的设计应用，遗传算法的应用。

(6) 文[41]是微分几何理论的应用，结果不但能够体现电力系统的非线性，而且具有很好的自适应性。

(7) 模糊逻辑控制以及能量函数法的应用。

#### 4.1.2 暂态稳定控制类型

传统的暂态稳定控制器被设计成一个有固定程序的开环控制器，当探测到系统电力系统发生大故障时（一般是指断路器触头或继电保护系统传回的故障信号），这个固定的程序就会被触发，就会在一段时间内产生一个最大补偿度，这种开环控制不能保证系统的稳定性。文[42]给出了一种最初的闭环控制方法，当系统发生故障时，可以使系统在最短的时间里恢复到稳定运行状态，这就是 Bang-Bang 控制器。文[43]中也给出了一种具有鲁棒性的暂态稳定控制策略。文[44]应用最优时间切换策略来控制 TCSC，通过相平面图分析得到 Bang-Bang 控制的开关曲线。文[45]是研究模糊逻辑控制在 TCSC 暂态稳定控制中的应用。

阻尼系统振荡类型的 TCSC 控制器也都是用于暂态稳定控制，但反过来就不成立。不管是阻尼系统振荡类型还是暂态稳定控制类型，TCSC 的稳定控制技术总的可以分为以下几类：

(1) 线性控制理论类。像阻尼系统振荡类型的前几种技术都属于这个范畴。这种线性控制系统设计的基点是电力系统的某个运行点，当系统在这个运行点附近运行时，稳定

控制效果好。但是如果系统的运行情况发生变化时,系统的稳定性就不能保证。而且这种理论设计的控制器大都停留在固定的结构和固定的参数,自适应性不够好。优点就是简单比较容易实现。

(2) 非线性控制理论类。主要包括变结构控制、微分几何理论、能量函数法、模糊逻辑控制理论等。应用这类控制理论来控制系统能够反映出电力系统的非线性,它们通常具有很好的鲁棒性和自适应性,但是他们的计算量相当大而且还存在其它的一些约束影响了它的实际应用。

(3) 智能控制技术类。这其中包括了遗传算法、神经网络等。这类算法不但可以用来设计控制器,还可以用来优化控制器的参数。这种类型的控制器具有很好的鲁棒性、自适应性和抗干扰能力。

### 4.1.3 稳定控制模型的输入

控制系统的输入信号对于一个控制系统来说十分重要。文[46]采用了远方变量作为输入信号,甚至于远方发电机的暂态变量,这就给测量和传输这些变量造成了很大困难。所以更多的控制系统是采用当地测量的量作为输入信号的,其中文[47]就是通过对多机电力系统进行等值处理,应用直接大范围现行化方法,设计了一种以当地测量量进行反馈的可控串连补偿电容控制器,文章里还提出了一种确定系统等值参数的优化方法。因为稳定计算时,发电机的功角测量起来比较困难,传统的稳定控制器一般都采用系统的频率或交流线路的有功功率作为输入信号。

### 4.1.4 TCSC 的综合控制

TCSC 的综合控制图如图 4-1,其中控制模块 1 因控制目标和控制方法的不同而不同,所采用的阻尼控制方法和暂态稳定控制方法已经在上边列出。

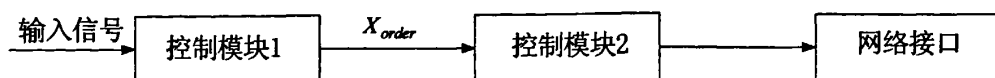


图 4-1 TCSC 综合控制图

Fig 4-1 TCSC comprehensive control chart

控制模块 2 主要是用来模拟得到命令阻抗  $X_{order}$  后,  $X \sim \alpha$  之间的实际控制的数学模拟问题常用的有用一个惯性环节,或者用一个 PI、PID 环节<sup>[48]</sup>的模拟等。

TCSC 传统的控制模型如图 4-2 所示<sup>[34]</sup>：

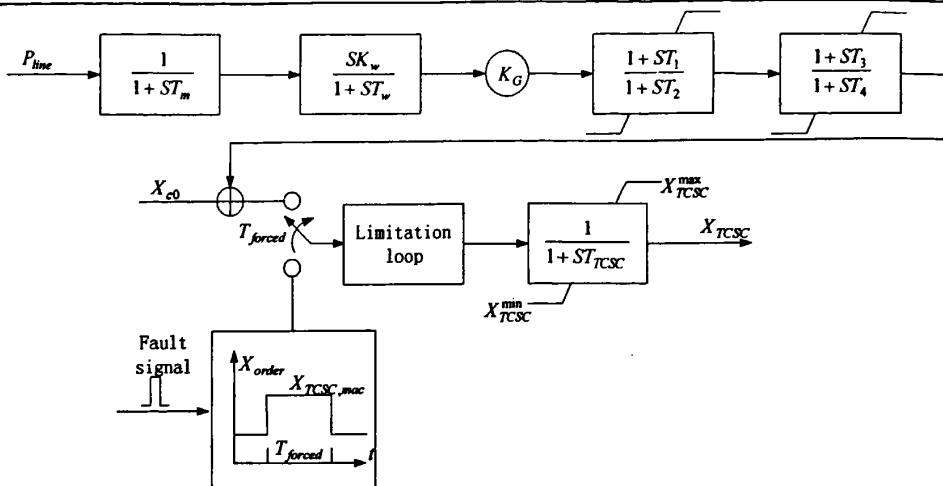


图 4-2 TCSC 传统的控制模型

Fig 4-2 TCSC tradition control model

图中最上边为 POD 控制，最下边为暂态控制，中间则为控制模块 2 所对应的控制环节。当系统发生大故障时，有故障信号输入暂态控制环节，TCSC 的等效阻抗被设置在最大，经过  $T_{forced}$  时间后，就转入 POD 调节。

## 4.2 几种 TCSC 的稳定计算模型

### 4.2.1 Bang-Bang 控制器<sup>[42][43]</sup>

在系统发生大的扰动之后让系统回到初始的运行状态可以被看成是一个目标函数为最小时间的优化问题（即在最短时间内让系统回到初始运行状态），可以采用运用了庞特里亚金极大值原理的 bang-bang 控制器来控制线路上的电抗以达到优化控制的目的。

系统的动态过程用以下状态变量来反映：

$$x_1 = \delta, \quad x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\delta}$$

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad \dot{x}_2 = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} P_s, \quad 0 \leq t \leq RC \quad \text{故障时, RC 为重合闸时刻;}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{\pi f}{H} \left( P_s - \frac{E_1 E_2}{X} \sin x_1 \right), \quad RC \leq t \quad \text{重合闸以后。}$$

问题现在就转化为对于一个自发的、非线性、无阻尼的非线性系统（用如上微分方程所表示）已知状态变量的初始值和末值，现在就是要找到一个最优控制在最短时间内完成由初值到末值的转换，即：

目标函数：
$$\int_{t^0}^{t^f} dt = (t^f - t^0)$$

约束条件： $|X| \geq X^M$ ， $X^M$  是允许的最小  $X$  值。

这里  $X$  是控制变量，通过庞特里亚金极大值原理对其进行求解，具体过程见文[42]，结果如下：

$$X_{opt} = X_{min} \text{sign}(-\eta_2 \sin x_1) = \begin{cases} X_{min}, & \eta_2 \sin x_1 < 0 \\ -X_{min}, & \eta_2 \sin x_1 > 0 \\ \text{arbitrary}, & \eta_2 \sin x_1 = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

其中  $\eta$  是 Hamiltonian 函数中的一个拉格朗日乘子。

$$\left( H = \eta_1 x_2 + \eta_2 \frac{\pi f}{H} \left( P_s - \frac{E_1 E_2}{U} \sin x_1 \right) - 1 \right)$$

优化控制就是要是支路上的电抗值为它的最小值(或正或负)或者在电抗取值范围的边界。称  $\eta_2 \sin x_1$  为开关函数。很明显这种控制具有 Bang-Bang 控制特性。系统正常运行时 TCSC 等效电抗为  $x_c^s$ , 最大运行阻抗为  $x_c^{\max}$ , 最小运行阻抗为  $x_c^{\min}$ 。在相平面图中以初始运行点  $(\delta_e^s, 0)$  为目标运行点,  $x = x_c^{\min}$  对二阶模型进行求解, 得到一条开关曲线 [44]。

当大故障发生时  $x = x_c^{\max}$ , 在此情况下, 系统按照此情况下的暂态运行轨迹运行, 当它与开关曲线相交时  $x = x_c^{\min}$ , 此后系统就沿着开关曲线运行到  $(\delta_e^s, 0)$  时  $x = x_c^s$  并触发相应的阻尼环节。

#### 4.2.2 标准的 Brunovsky 线性模型<sup>[49]</sup>

针对电力系统是一仿射的非线性系统<sup>[50]</sup>, 这种方法主要是对于一个非线性控制系统的线性化不仅在一点, 而是在整个区域进行(前提此系统为一个仿射的非线性控制系统)。详细方法见文[49]。结果如下:

$$u(t) = \frac{-P_m + D \frac{\Delta \omega}{\omega_0} + H \frac{(-\Delta \delta - \sqrt{2} \Delta \omega)}{\omega_0}}{-E_q' V_s \sin \delta} = \frac{1}{x_{line} + \tilde{x}_{TCSC}} \quad (4.2)$$

$$\tilde{x}_{TCSC} = -\frac{x_{line} + E_q' V_s \sin \delta}{P_e + H \frac{(\Delta \delta + \sqrt{2} \Delta \omega)}{\omega_0} + H \frac{\Delta \dot{\omega}}{\omega_0}} \quad (4.3)$$

$$x_{TCSC}(\alpha) = \tilde{x}_{TCSC}(\alpha)$$

$$x_{TCSC}(\alpha) = \frac{k^2}{\pi \omega C (k^2 - 1)} (\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha) - \frac{1}{\omega C} - \frac{4k^2}{\pi \omega C (k^2 - 1)^2} \quad (4.4)$$

$$\text{其中: } k = \frac{1}{\omega \sqrt{LC}} \left[ k \sin^2 \alpha \tan k \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right]$$

这种控制系统的输入信号是  $\omega$ 、 $\delta$ 、 $P_c$ ，输出信号是晶闸管的触发角  $\alpha$ 。这种控制方法需要知道  $E_q$ 、 $V_s$ 、 $\delta$ 、 $\omega$  和  $\delta_0$  得值，而这些值的获得可以通过当地的测量环节得到<sup>[51]</sup>。一旦  $\omega$ 、 $\delta$ 、 $P_c$  的值给出，就可以通过(4.3)式得到  $\bar{x}_{TCSC}$  的值，然后再通过(4.4)式求解出  $\alpha$ 。

### 4.3 仿真中所采用的 TCSC 模型

#### 4.3.1 TCSC 在暂态稳定计算的数学模型

文[52]告诉当晶闸管的触发角改变后，TCSC 装置需要 8~10 个周期甚至更长时间才能达到稳定运行的条件。但根据第二章给出的 TCSC 基波等值电抗是在不计 TCSC 自身的暂态过程的条件下导出的。由于在电力系统暂态稳定计算中，网络的数学模型已采用了稳态模型，同理 TCSC 在系统暂态稳定计算中的数学模型也采用第二章给出的稳态模型。对触发控制的暂态过程用时间常数为  $T_{TCSC}$  的一阶惯性环节模拟。

由于电力系统暂态稳定控制问题的高度非线性，系统地设计全局状态反馈几乎是不可能的。因而通常总是采用局部量反馈控制。反馈控制信号可以为系统频率、发电机转速、线路有功功率或者它们的组合。本文采用线路有功功率。稳定控制器如图 3-5 所示<sup>[53]</sup>。 $T_m$  和  $T_w$  分别为测量环节和清除环节的时间常数； $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  为两级超前滞后校正环节的时间常数； $K$  为增益。注意到 TCSC 的容量约束，控制器中还有限幅环节。

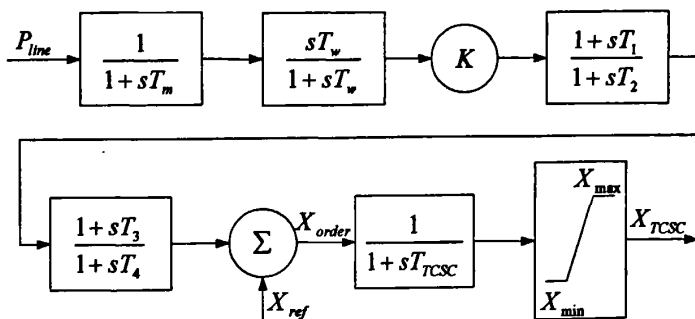


图 4-3 TCSC 动态控制传递函数框图

Fig 4-3 TCSC dynamic control transfer function diagram

#### 4.3.2 TCSC 的运行区域

由图 4-2 知，理论上无论是感性区域还是容性区域，TCSC 的补偿度都可以达到任意大。但是，实际上 TCSC 的运行范围受到电容器容量及其耐过电压、过电流的能力和次同步谐振等问题的约束。文献 [54] 给出了一个具体的约束，如图 4-4 所示。

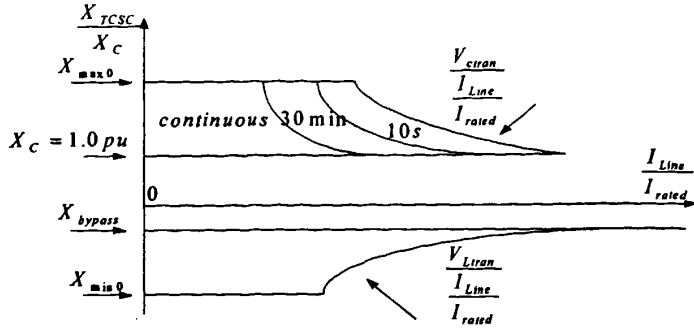


图 4-4 TCSC 的运行区域

Fig 4-4 TCSC movement region

图中  $V_{Ctran}$  和  $V_{Ltran}$  分别表示当 TCSC 运行在容性范围和感性范围内时所能承受的最大过电压,  $I_{rated}$  表示线路额定电流, 图中所标 continuous, 30min, 10s 分别表示在此区间可连续运行、可持续运行 30 分钟、可持续运行 10 秒钟。

TCSC 的阻抗限幅环节本文所取得参数和 Slatt500KV 工程<sup>[6]</sup>所取参数相似。还有文[55]中所提到的一些参数。

容性区域的限制主要有以下三个方面来决定:

- (1) 由触发角的限制而引起的阻抗限制, 一般取  $X_{max0} = 3$ ;
- (2) 由于 TCSC 暂态过电压 ( $V_{Ctran}$ ) 而引起得限制;

其中容性暂态过电压  $V_{Ctran} = 2$

$$X_{maxVC} = V_{ctran} \frac{I_{Lrated}}{I_{Line}}$$

由于线路过电流 ( $I_{Ltran}$ ) 而引起的限制, 这时 TCSC 转入旁路模式。

$$X_{maxIL} = \begin{cases} \infty & I_{Line} < I_{Ltran} I_{Lrated}, \text{ 其中 } I_{Ltran} = 2 \\ X_{bypass} & I_{Line} > I_{Ltran} I_{Lrated} \end{cases}$$

因此, 当 TCSC 表现为容性时其限幅环节值为:

$$X_{max} = MIN[X_{max0}, X_{maxVC}, X_{maxIL}]$$

在感性区域也有相类似的限制:

- a)  $X_{min0} = -2$
- b)  $X_{minVL} = V_{Ltran} \frac{I_{Lrated}}{I_{Line}}$
- c)  $X_{minILT} = \left[ 1 - \frac{I_{Ltran} I_{Lrated} (1 - X_{bypass})}{I_{Line}} \right]$

当 TCSC 表现为感性时其限幅环节值为:

$$X_{min} = MAX[X_{min0}, X_{minVL}, X_{minILT}]$$

实际仿真计算中, 往往对其进行简化, 本文仿真时采取类似文[11]的简化方法, 具体应用见第五章。

## 4.4 含 TCSC 的电力系统暂态稳定性分析其它元件模型<sup>[56]</sup>

### 4.4.1 同步发电机模型

$$T'_{d0} p E'_q = E_{f0} - \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x_d} E'_q + \frac{x_d - x'_d}{x'_d - x_d} E''_q \quad (4.5)$$

$$T''_{d0} p E''_q = E'_q - E''_q - (X'_d - X''_d) I_d \quad (4.6)$$

$$T'_{q0} p E'_d = -\frac{x_q - x'_q}{x'_q - x_q} E'_d + \frac{x_q - x'_q}{x'_q - x_q} E''_d \quad (4.7)$$

$$T''_{q0} p E''_d = E'_d - E''_d + (x'_q - x''_q) I_q \quad (4.8)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega_s - 1)\omega_s \quad (4.9)$$

$$\frac{d\omega_s}{dt} = \frac{1}{T_J} \left( -D\omega_s + \frac{P_{m^*}}{\omega_s} - \frac{P_{e^*}}{\omega_s} \right) \quad (4.10)$$

### 4.4.2 电机励磁系统数学模型

以下图 4-5、4-6、4-7 分别是直流励磁机励磁系统、交流励磁机励磁系统和静止励磁系统的传递函数框图。

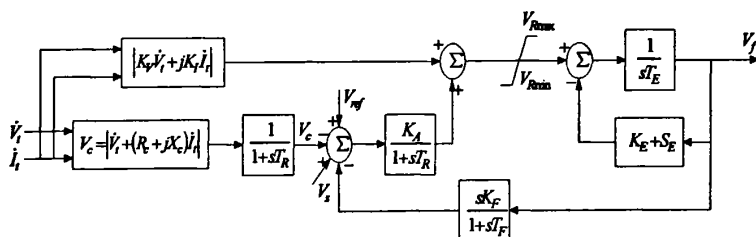


图 4-5 采用可控相复励调节器的直流励磁机励磁系统

Fig 4-5 Use the controllable compound excitation regulator's direct-current excitation system

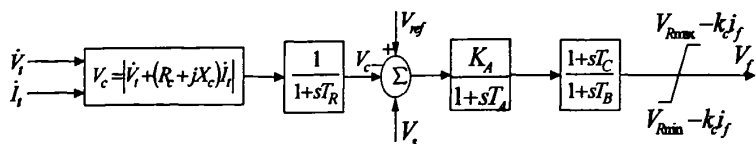


图 4-6 采用可控功率整流器的交流励磁机励磁系统

Fig 4-6 Uses the controlled power rectifier's alternator-rectifier exciter system



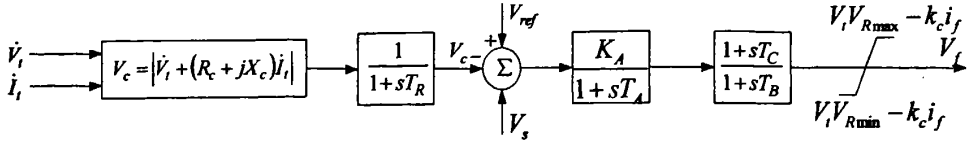


图 4-7 自并励静止励磁系统的传递函数框图

Fig 4-7 Application of self-excitation system's transfer function diagram

### 4.4.3 PSS 数学模型

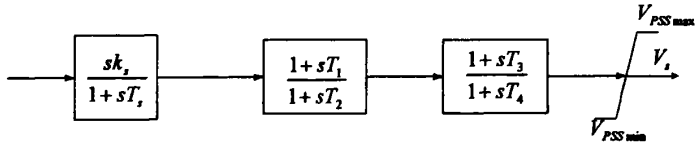


图 4-8 电力系统稳定器传递函数框图

Fig 4-8 PSS transfer function diagram

输入信号常采用发电机的转速、频率、输出功率、端电压或者它们的组合，输出信号  $U_{pss}$  加至各种励磁系统中参考电压的相加点上。

### 4.4.4 原动机及其调速系统数学模型

#### a. 水轮机及其调速系统数学模型

水轮机的数学模型： $P_m = \frac{1 - T_w p}{1 + 0.5 T_w p} \mu$  其中  $\mu$  为导水叶开度， $T_w$  为水锤时间常数。

水轮机调速系统的数学模型：

(1) 离心飞摆方程： $\eta = k_s (\omega_0 - \omega)$

(2) 配压阀活塞方程： $\rho = \eta - \zeta$

(3) 接力器活塞方程： $T_s p \mu = \rho$

(4) 反馈方程（包括硬反馈和软反馈）

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_2 = \frac{k_\beta T_i p}{T_i p + 1} \mu + k_\sigma \mu; \quad \text{其中: } k_\sigma = \frac{\sigma}{\omega}, \quad k_\beta = \frac{\beta}{\delta}, \quad \delta = \frac{1}{k_s}$$

$\sigma$  为调差系数， $\delta$  为测量元件的灵敏度， $\beta$  为软反馈系数。传递函数框图如图 4-9 所示：

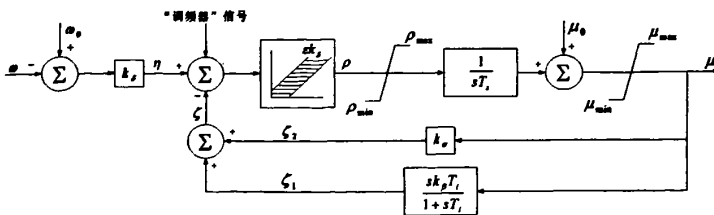


图 4-9 离心飞摆式调速系统传递函数框图

Fig 4-9 The offcenter flies suspends the type velocity modulation system transfer function diagram

b. 汽轮机及其调速系统数学模型

汽轮机的数学模型： $P_m = \frac{1}{T_{CH} p + 1} \mu$   $T_{CH}$  为蒸汽容积时间常数。

汽轮机调速系统的数学模型：

大体可分为机械液压式调速器、电气液压式调速器、功率—频率电气液压调速器。其中机械液压式调速系统框图如图 4-10 所示：

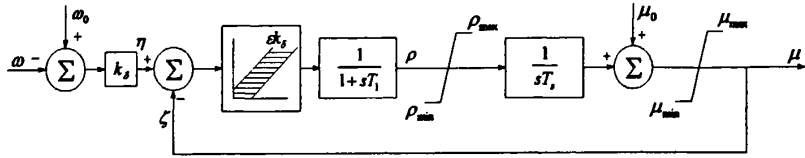


图 4-10 汽轮机机械液压式调速系统传递函数框图

Fig 4-10 Steam turbine mechanical hydraulic pressure type velocity modulation system transfer function diagram

4.4.5 负荷模型

(1) 考虑静态特性的模型

$$P = P_0 \left[ A_p \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + B_p \left( \frac{V}{V_0} \right) + C_p \right] \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{F_p} \quad (4.11)$$

$$Q = Q_0 \left[ A_q \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 + B_q \left( \frac{V}{V_0} \right) + C_q \right] \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{F_q} \quad (4.12)$$

(2) 感应电动机的模型

$$T_{JM} \frac{ds}{dt} = T_{mM} - T_{eM} \quad (4.13)$$

$$T_{mM} = k \left[ \alpha + (1 - \alpha(1 - s)^{P_m}) \right] \quad (4.14)$$

$$\dot{U}_L = (1 - s) \dot{E}'_M - [R_1 + j(1 - s)X'] \dot{I}_M \quad (4.15)$$

$$T'_{d0} p \dot{E}'_M = -(1 + jsT'_{d0}) \dot{E}'_M - j(X - X') \dot{I}_M \quad (4.16)$$

$$T_{eM} = -\text{Re}(\dot{E}'_M \dot{I}_M) \quad (4.17)$$

在第五章的仿真计算中，对于陕西电网的负荷采用 30%感应马达和 70%恒定阻抗（非高耗能用户），10%感应马达和 90%恒定阻抗或恒定电流（高耗能用户），60%感应马达和 40%恒定阻抗（发电厂厂用电）的负荷模型。

## 5 TCSC 对陕西电网暂态稳定性的作用仿真

本文首先对一个四机系统进行暂态稳定性的作用仿真,以验证算法的正确性和 TCSC 对系统暂态稳定性控制的有效性,然后转入本论文主要解决的问题——研究 TCSC 在陕西电网 2007 年目标网架下提高从陕北向关中暂态稳定极限功率中的作用,仿真数据以陕西电网 2007 年运行方式中 2007 年预测负荷和目标网架为对象,负荷数据在计算过程中保持不变,只改变开机方式(由于陕西电网主要以火电为主,因此选取冬季大方式运行时的开机方式和负荷水平,只对单独机组进行调整)。通过计算表明陕北清水川 1 号机与安康电厂 1 号机及宝鸡二厂 1 号机组的功角摇摆曲线表征系统的稳定性。主要研究内容有 TCSC 的安装地点、容量、安装 TCSC 的线路控制功率和控制参数。

仿真计算采用中国电力科学研究院的 PSASP 电力系统综合程序软件。由于电力系统中含有新型动态元件 TCSC,因此,PSASP 软件无法加载整个网架数据,本文仿真的潮流计算的流程如图 3-4 所示,TCSC 稳定计算采用的控制模型为图 4-2 所示的控制模型,通过 PSASP 的用户自定义功能嵌入。

### 5.1 PSASP 实现原理

随着电力系统和电力电子技术的发展,新型系统元件不断投入和系统控制技术日益进步,要求在电力系统计算中能够模拟若干新型元件和各种控制功能。而 PSASP 程序为了满足电力科技工作者在这方面的需求,PSASP 开发人员也在程序中实现了用户自定义模型和用户自定义程序。通过这两方面的功能,用户可以将自己的程序和自己定义的模型与 PSASP 进行联算。因为在此课题的研究中主要用到用户自定义模型这一块,因此这里对 PSASP 的这一功能进行简要说明。

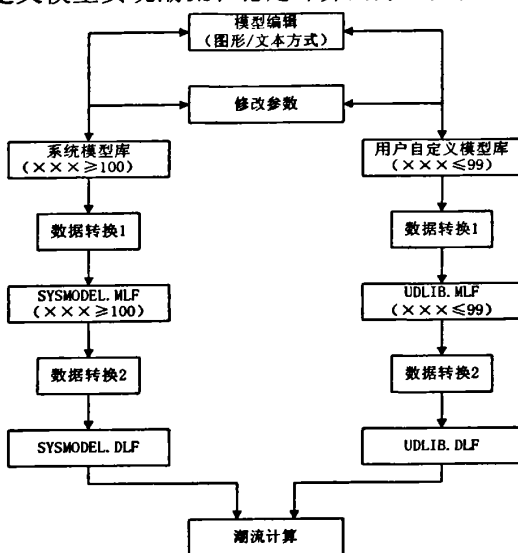
为了实现用户自定义建模功能,PSASP 完成了以下几方面的工作。

(1) 基本功能框的建立。各种基本功能框是自定义模型的最小组成部分,通过一些功能框的连接装配,即可设计定义用户所需的模型,称之为用户自定义(UD)模型。每一基本功能框可根据输入量 ( $X_1, X_2$ ) 完成求输出量  $y$  的运算。PSASP 根据需要,在程序中设置了 50 多个功能框,并可根据实际情况进一步扩充。按性质,这些功能框基本上分为微积分运算、代数运算、基本函数运算、逻辑控制运算、线性和非线性函数运算及其他运算等类型,可以为潮流和暂态稳定及其它相关计算程序所公用。因此只要有足够多的基本功能框,就可以构建所需的模型,完成相应的功能。

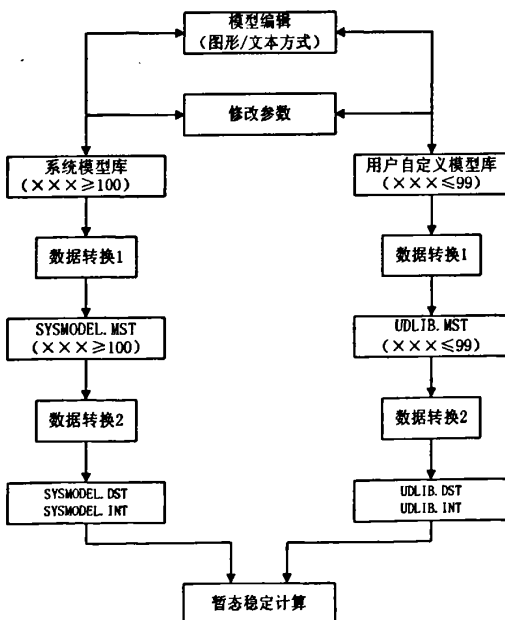
(2) 输入和输出信息的规定。输入和输出信息的设计应根据问题和需要而定,一般应该是充足和必要的。PSASP 在潮流程序中,把计算的已知量和有关的待求量作为输入和输出信息。在暂态稳定程序中,其输入信息有母线、发电机、负荷、直流线和正、负、零序网络的有关变量,输出信息有发电机、直流线的有关量和切机、切负荷及网络操作等。因此只要程序提供了完备的输入和输出信息,就能够实现任何自定义模型与电力系统的连接。

(3) 模型定义编辑环境的设计。模型的定义建立必须要遵从一定的规则，如：功能框之间的连接关系，输入、输出信息的接入，参数的给定等。PSASP 提供了既有提示，又有约束的直观友好的图形/文本两种建模编辑环境，为用户正确建立模型创造了条件。用户可在这样的模型编辑环境中，根据给定的基本功能框和输入、输出信息建立自己所需的模型。

PSASP 和用户自定义模型实现潮流和稳定计算的方法如图 11 所示。



(a) SASP 和用户自定义潮流计算实现原理图



(b) PSASP 和用户自定义稳定计算实现原理图

图 5-1 PSASP 和用户自定义潮流稳定计算实现原理图

Fig 5-1 PSASP and UD the current stable computation realizes the schematic diagram

虽然 PSASP 可以实现用户自定义模型，但是随着用户对这方面要求功能的加强，PSASP 程序在某些方面的功能并不是很完美，因此需要进一步的完善。

## 5.2 简单系统的暂态仿真

### 5.2.1 仿真系统

仿真所采用的系统接线图如图 5-1 所示，为四机两区域系统，系统基准电压为 230 千伏，系统元件所取参数如文[57]，稳定计算不考虑 PSS 和调速器的控制作用，7 节点和 9 节点之间相距 220 千米，将 TCSC 安装在 7 节点和 8 节点之间的任意条支路上，所取参数如表 5-1，对限幅环节处理成固定阻抗，仿真时段为 0~15 秒。

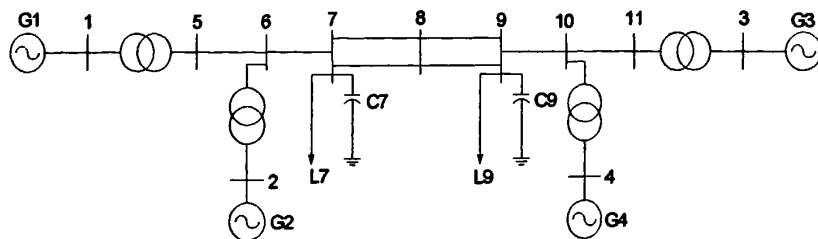


图 5-2 两区域电力系统接线图

Fig 5-2 Two region electrical power system diagram

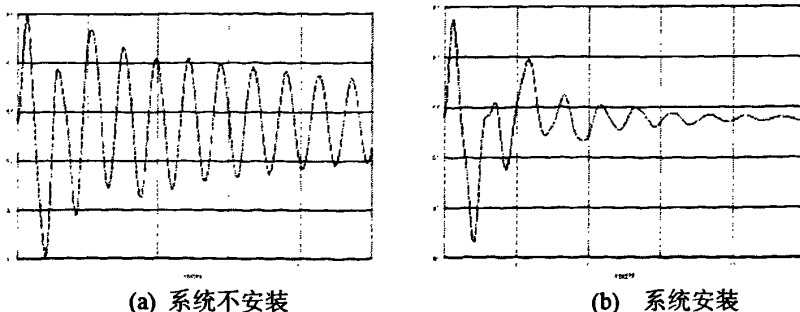
表 5-1 测试系统中 TCSC 所用参数

Table 5-1 In the test system TCSC uses the parameter

$T_m$	$T_w$	$T_1$	$T_2$	$k$	$T_{tcsc}$	$X_{max}$	$X_{min}$
0.05 s	3.0 s	0.13 s	0.65 s	1.0	0.015s	0.132pu	0.077pu

### 5.2.2 两区域系统的仿真试验

系统故障设在 7 到 8 节点的另一线路（没有安装 TCSC）上发生三相短路接地故障，故障点距离节点 7 为这条线路总长的 99%，故障时间段为 0~0.1 秒，0.1 秒后系统重合闸成功，系统恢复。支路控制功率取 200MW，G1-G3 的功角关系如图 5-3 所示，母线 8 得电压波动情况如图 5-4。



(a) 系统不安装

(b) 系统安装

图 5-3 有无 TCSC 时的 G1-G3 的功角关系

Fig 5-3 with and without TCSC G1-G3 merit angle relations

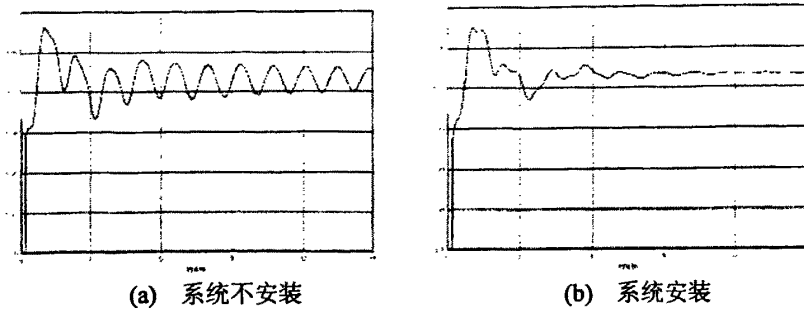


图 5-4 有无 TCSC 时的母线 8 的电压波形图

Fig 5-4 with and without TCSC bus 8 voltage oscillogram

### 5.2.3 仿真结果的简单分析

通过以上的简单仿真试验可以看出，对于功角稳定性问题，TCSC 能使系统很快的停止振荡，而且头摆也明显减小，对于电压稳定性的影响也很明显。这表明 TCSC 对提高简单系统暂态稳定方面效果明显，同时也说明所选择的控制模型的有效性。

### 5.3 陕西电网的暂态稳定仿真数据<sup>[58-61]</sup>

本论文主要是研究 TCSC 的加入对陕西电网北电南送暂态稳定功率传输极限的影响，为陕西应用 TCSC 做先期得数值计算。所以在计算时只考虑一个模块的结构控制，而不考虑多模块控制。由于陕西电网以火电为主，当陕北电网机组大发时完全送出时系统应处在冬大方式下比较合理，因此仿真选择在陕西电网 2007 年的冬季大方式下进行仿真。

2007 年陕西电网接线示意图如图 5-4 所示：

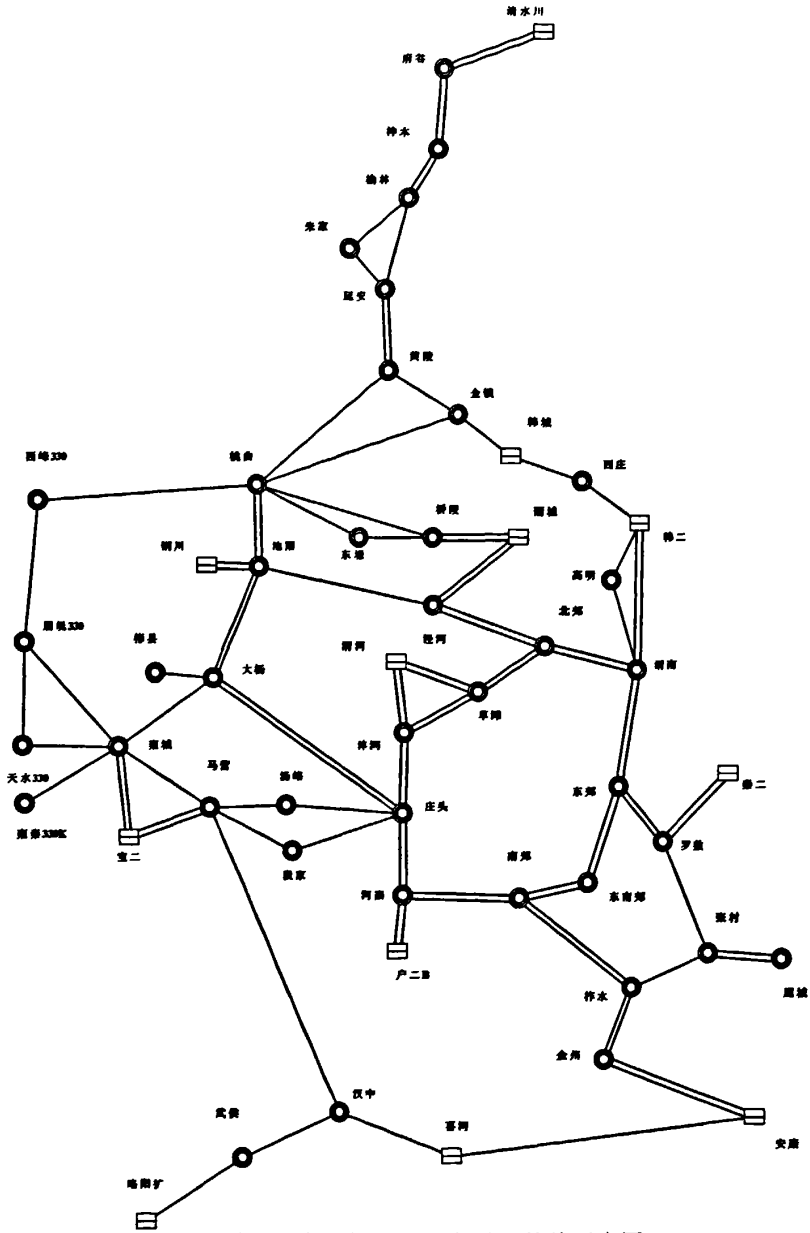


图 5-5 陕西电网 2007 年地理接线示意图

Fig 5-5 Shannxi electrical network in 2007 geography wiring schematic drawing

### 5.4 陕北断面稳定极限

考虑到陕西电网和西北电网的关系及陕西电网发展的情况,在这里分析考虑了三种情况下的陕北电网向关中电网送电时的稳定极限:陕甘断面交换功率变化时陕北电网向关中电网送电的稳定极限;陕北负荷发生变化时陕北电网向关中电网送电的稳定极限;陕北机组开机方式变化时陕北电网向关中电网送电的稳定极限。

陕甘断面交换功率变化时对陕北功率南送无明显影响。在冬季大负荷方式下,由甘肃向陕西通过四条 330kv 线路输送功率在 0~950MW 变化时,陕北延榆断面(限制断面)外送功率极限基本保持在 340~350MW;

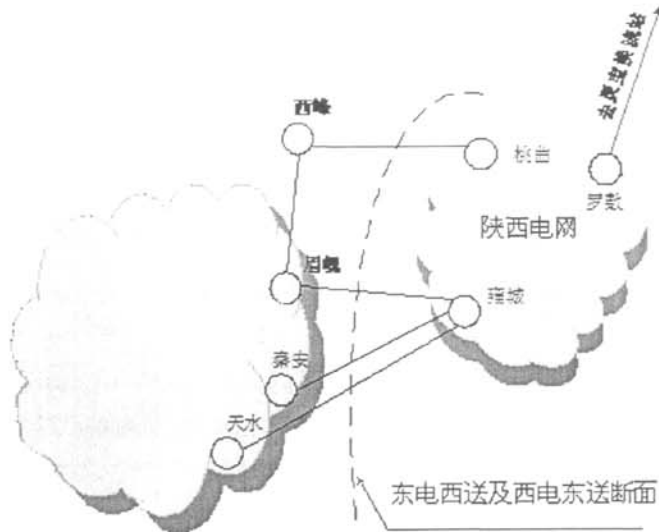


图 5-6 陕西与甘肃 330kv 线路接线示意图

Fig 5-6 Shannxi and Gansu 330kv line wiring schematic drawing

陕北负荷发生变化时对陕北电网向关中电网送电的稳定极限有很大的影响。负荷水平在 80%~120%范围内变化时,随着负荷水平的提高,陕北电网稳定性变差,延榆断面输送功率极限呈单调递减趋势;在 80%负荷水平时延榆限制断面稳定极限为 387.0MW;

陕北机组开机方式变化对陕北电网向关中电网送电的稳定极限也有很大的影响。这里开机方式的变化主要是指陕北机组优先满发北部机组还是优先满发南部机组,通过计算可以到一个明显的结论:优先满发南部机组有利于提高功率外送极限。因此在选择陕北地区南部机组优先满发的开机方式下延榆限制断面稳定极限为 341MW;



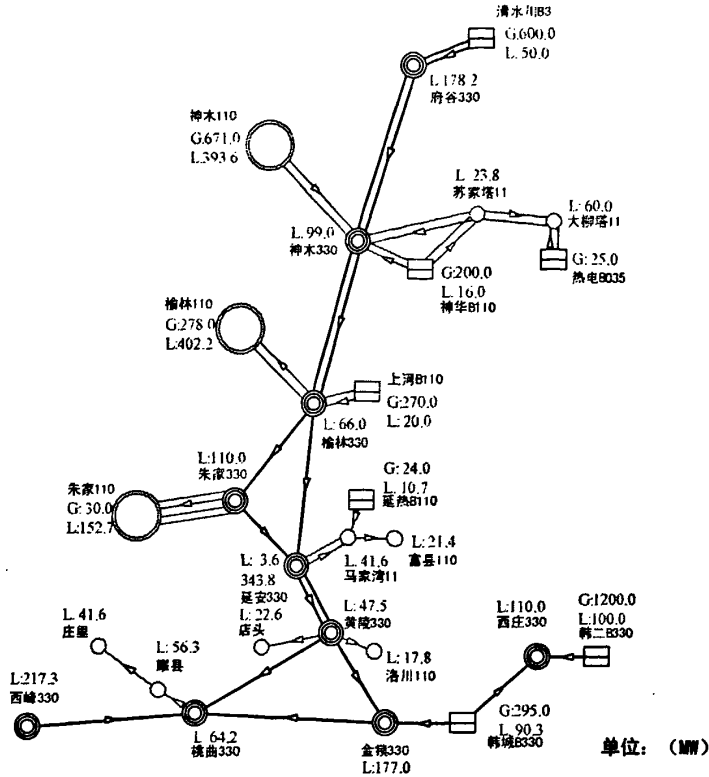


图 5-7 陕北地区高峰负荷水平与机组示意图

Fig 5-7 North Shannxi area peak load level and unit schematic drawing

通过计算可以明显得出一个结论：在选择合理的陕北机组开机方式前提下，同时陕北地区处于低水平负荷时，在此种有利于提高陕北送出稳定极限的理想条件下，稳定极限也仅能达到近 400MW，远远小于 330kv 线路的热稳定极限。这就说明陕北电网和关中电网的联系较弱，不能满足陕西电网安全运行的要求。因此，在保证电网安全稳定运行和满足经济性两方面要求综合考虑，本文选择了在榆林-朱家线路上装设 TCSC 装置来提高线路的稳定极限，解决陕西电网存在的问题，满足陕西电网的发展需求。

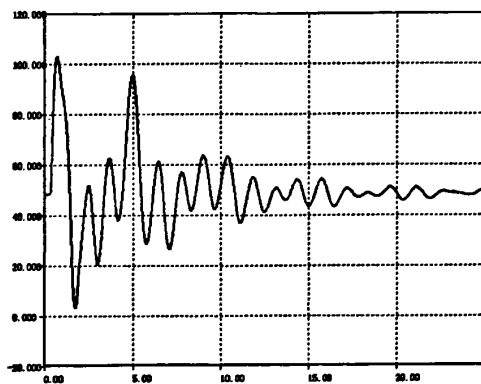
## 5.5 陕西局部电网加装 TCSC 的暂态仿真

通过在输电线路上串联 TCSC 装置来动态调整输电线路的等效阻抗，提高系统的稳定性。潮流计算中 TCSC 模型比较简单，可以将其视为一个可调阻抗进行计算，根据线路输送容量的要求设定 TCSC 的阻抗在合适的值。稳定计算中 TCSC 需要做的工作量就比较多了，需要设定 TCSC 控制器的参数在合适的值，这样在暂态过程中就可以充分体现 TCSC 的控制效果。因此需要对 TCSC 的控制参数做充分的分析才能够得到一般的规律，这样才能为日后工程实施、设备运行提供理论依据和技术支持。在本课题的研究过程中对 TCSC 的控制模型采用传统控制模型，具体控制框图如前，其中需要调整的参数有  $k$ 、

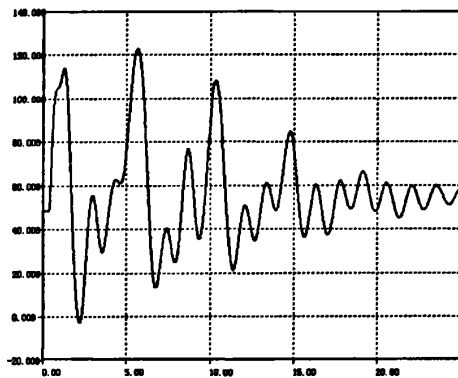
$T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 和 $T_{forced}$ 。课题将结合西北电网中期稳定计算数据和陕西电网发展规划情况研究了 TCSC 控制器参数对暂态稳定的作用和影响。

### 5.5.1 故障地点的选择

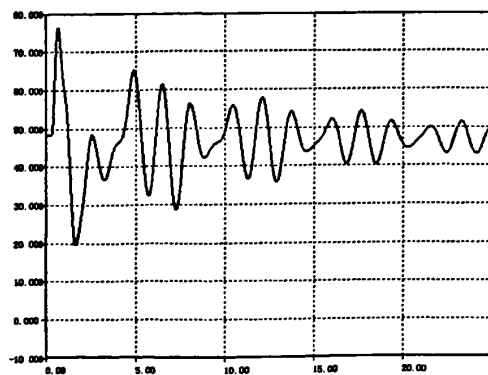
要在不加装 TCSC 的情况下,根据仿真找到系统最严重的故障作为以后电力系统暂态稳定仿真时的系统故障,不管是找最严重的系统故障还是以后做 TCSC 对系统稳定影响的仿真。分别在神木 330—榆林 330、榆林 330—延安 330、朱家 330—延安 330、黄陵 330—延安 330 和榆林 330—朱家 330 线路上作三相短路接地仿真试验,分别得到图 5—8 所示清水川电厂 1J 与安康电厂 1J 的功角差图。根据仿真所的结果及西北电网运行人员的经验得知榆林 330—延安 330 线路发生三相短路接地故障对系统北电南送影响最为严重。因此仿真时故障地点选在榆林 330 到朱家 330 之间,总计算时间为 25 秒,0.3 到 0.4 秒榆林侧发生三相短路接地故障,0.1 秒以后线路两侧三相跳开。



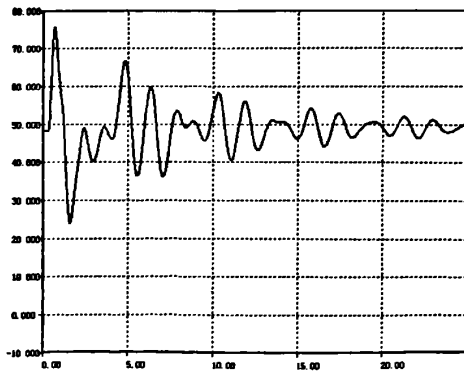
(a) 神木 330—榆林 330 线路故障



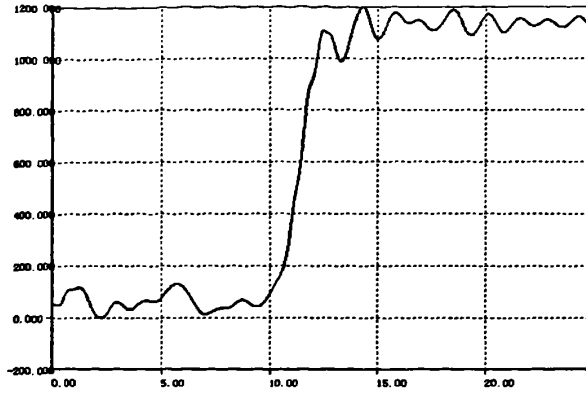
(b) 榆林 330—朱家 330 线路故障



(b) 朱家 330—延安 330 线路故障



(d) 黄陵 330—延安 330 线路故障



(e) 榆林 330—延安 330 线路故障

图 5-8 系统不同线路发生故障时功角图

Fig 5-8 Merit angle chart when the system different line breaks down

### 5.5.2 PID 参数优化与调整

在上一章所选择的控制模型的 PID 环节中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  为两级超前滞后校正环节的时间常数； $T_m$  和  $T_w$  分别为测量环节和隔直环节的时间常数； $k$  为增益； $T_{TCSC}$  为表征 TCSC 触发过程的时间常数。暂态控制环节主要有  $T_{forced}$  这个参数，其主要用来说明强迫补偿环节投入的时间长短。一般来讲， $T_m$ 、 $T_w$  和  $T_{TCSC}$  参数都是固定的，只需确定三个参数： $k$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  确定的方法是在由这三个参数张开的三维空间的第一个象限中逐点搜索，以得到效果最佳参数。网络元件模型和 TCSC 的限幅环节根据不同的仿真结果精度要求做了简化处理，课题研究中的取值见下表 5-2。

表 5-2 TCSC 控制模型中的固定参数

Table 5-2 In TCSC control model preset parameter

参数	数值 (秒)
$T_m$	0.05
$T_w$	3.0
$T_{TCSC}$	0.015

#### a. 超前-滞后环节超前时系统的稳定分析

仿真计算过程中，将 TCSC 装置正常运行对输电线路的补偿度取为 40%，这样，TCSC 控制器的限幅环节就可以根据前面的公式确定。

首先，取  $T_1=1.0$ ， $T_2=0.9\sim 0.1$ ，而  $k$  从 0.005 变化到 10.0。暂态仿真计算结果表明，当  $T_2>0.5$  时系统失稳，具体功角偏差曲线见下图 5-9。图中分别表示在  $T_1=1.0$ ， $T_2=0.6$

时,  $k=0.005、0.15、0.5、1.0、2.0、3.0、10.0$  时清水川 1J 和安康 1J 间的功角偏差曲线。

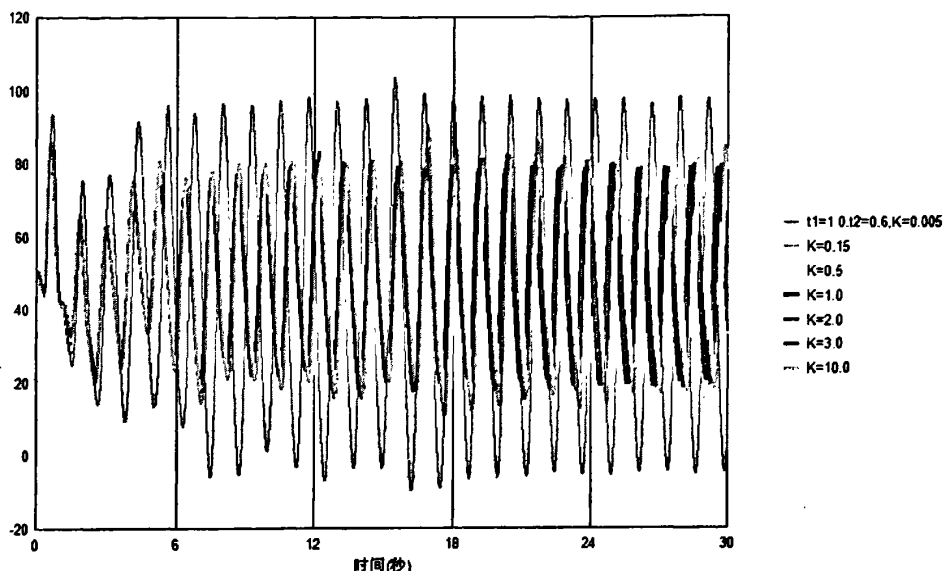


图 5-9 超前-滞后环节超前时  $T_2$  与  $k$  的变化对暂态稳定的影响 ( $T_1=1.0$ )

Fig 5-9 Advance - delay component in advance  $T_2$  and  $k$  change to transient stabilization influence ( $T_1=1.0$ )

通过大量的仿真计算可以发现, 当  $T_1$  和  $T_2$  取值过于接近时, 无论  $k$  取何值均不能保证系统发生扰动后仍能保持稳定;

其次, 增大  $T_1$  而  $T_2$  保持不变。令  $T_1=2.5$ ,  $T_2=0.1\sim 1.5$ ,  $k$  的取值和前面相同。暂态仿真计算结果表明, 当  $T_2>0.9$  时系统逐渐失去稳定性, 而在  $T_2=0.1\sim 0.6$  时效果非常理想。具体功角偏差曲线见下图 5-10。图中分别表示在  $T_1=2.5$ ,  $T_2=0.5$  和  $0.9$ ,  $k=0.005、0.15、0.5、1.0、2.0、3.0、10.0$  时清水川 1J 和安康 1J 间的功角偏差曲线。

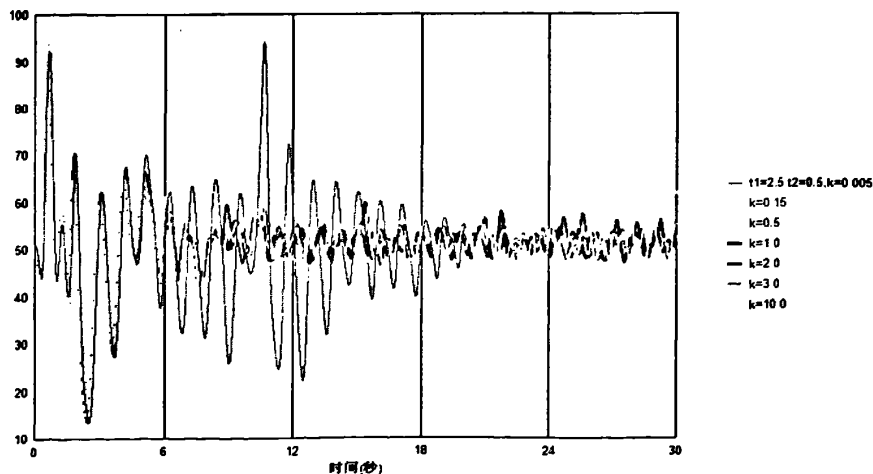


图 5-10 超前-滞后环节超前时  $T_2$  与  $k$  的变化对暂态稳定的影响 ( $T_1=2.5$ ,  $T_2=0.5$ )

Fig 5-10 Advance - delay component in advance  $T_2$  and  $k$  change to transient stabilization influence ( $T_1=2.5$ ,  $T_2=0.5$ )

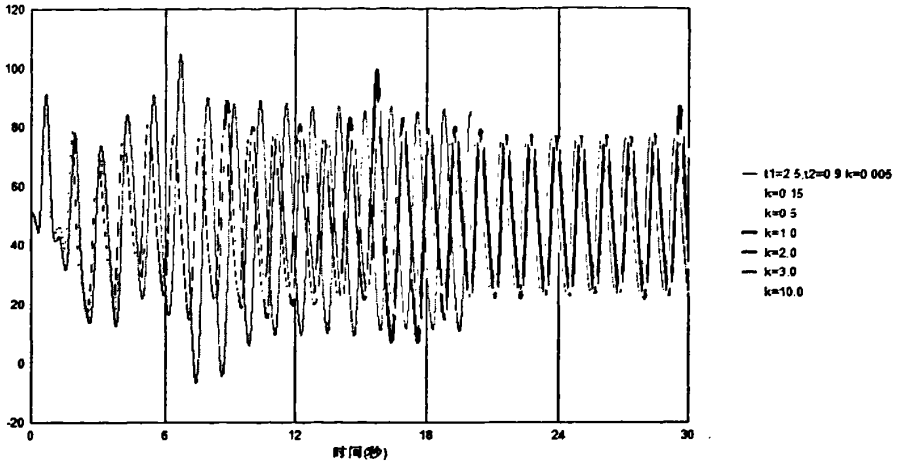


图 5-11 超前-滞后环节超前时  $T_2$  与  $k$  的变化对暂态稳定的影响 ( $T_1=2.5, T_2=0.9$ )

Fig 5-11 Advance - delay component in advance  $T_2$  and  $k$  change to transient stabilization influence ( $T_1=2.5, T_2=0.9$ )

最后，继续增大  $T_1$ ，令  $T_1=2.8\sim 3.8$ ， $T_2=0.1\sim 2.6$ ， $k$  的取值和前面相同。暂态仿真计算结果表明，当  $T_2=0.4$  和  $0.5$  时的效果非常理想外， $T_2$  的其他取值均不够理想，其中当  $T_2<1.0$  时，功角差呈等幅振荡状态， $T_2>1.0$  时系统完全失去稳定。

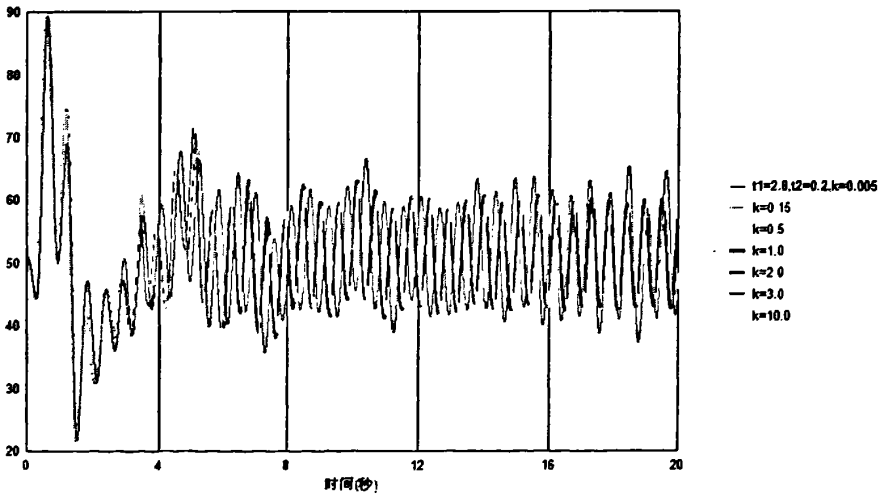


图 5-12 超前-滞后环节超前时  $T_2$  与  $k$  的变化对暂态稳定的影响 ( $T_1=2.8, T_2=0.2$ )

Fig 5-12 Advance - delay component in advance  $T_2$  and  $k$  change to transient stabilization influence ( $T_1=2.8, T_2=0.2$ )

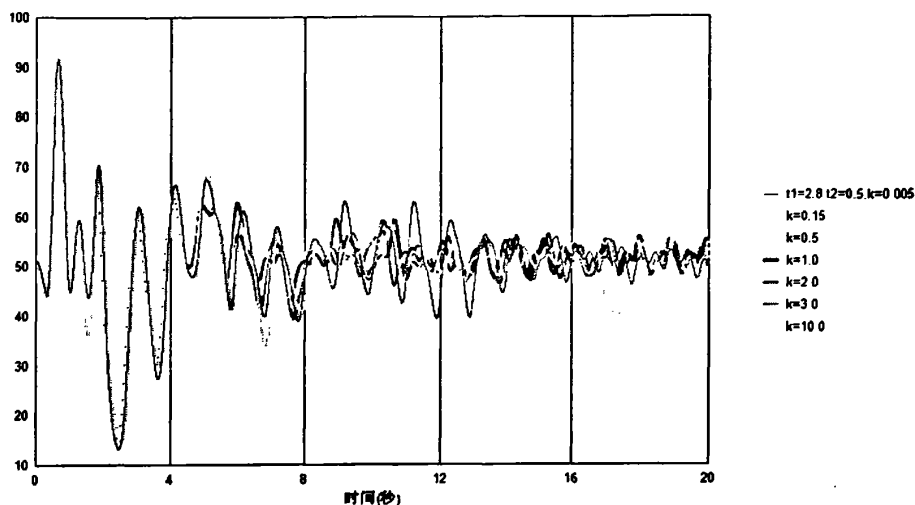


图 5-13 超前-滞后环节超前时  $T_2$  与  $k$  的变化对暂态稳定的影响 ( $T_1=2.8$   $T_2=0.5$ )

Fig 5-13 Advance - delay component in advance  $T_2$  and  $k$  change to transient stabilization influence  
( $T_1=2.8$ ,  $T_2=0.5$ )

通过对超前-滞后环处于超前时的暂态仿真及大量计算可以说明, 当  $T_1$ 、 $k$  选取后,  $T_2$  一般有一个取值范围, 在这个范围内取值, 系统的功角偏差曲线没有很大的变化;  $T_1$  的选择对  $T_2$  取值由很大影响, 不合理的  $T_1$  会使  $T_2$  选不到合适的值以保持系统稳定; 总体而言, 当超前-滞后环节处于超前时,  $T_2$  的取值均限制在 1.0 以内, 这样, 对于一个三维空间的取值问题首先把  $T_2$  的取值限定在一个较小的区域内, 有利于对于  $T_1$  和  $k$  的取值范围的确定。

超前一滞后环节处于超前条件下时, 功角偏差曲线不能很好的衰减是因为榆林-朱家线路的等值电抗不能保持在某一固定值, 而是不停地在摆动, 图 5-14 给出了某种情况下的 TCSC 控制下的线路电抗摆动曲线。

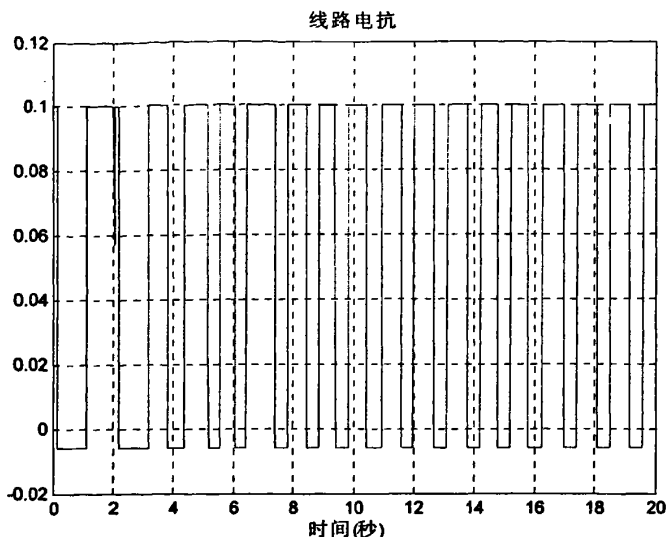


图 5-14 超前-滞后环节超前时线路的等效电抗变化曲线图

Fig 5-14 Advance - delay component in advance line's equivalent reactance change diagram of curves

b. 超前-滞后环节滞后时系统的稳定分析

相同的仿真计算过程，同样将 TCSC 装置正常运行对输电线路的的补偿度取为 40%。

首先，令  $T_1=0.1$ ,  $T_2=0.5\sim 2.5$ , 同时  $k$  从 0.005 变化到 10.0。计算结果表明，当  $T_2 < 0.6$  时，系统全部失稳； $0.5 < T_2 < 1.8$  时，系统仅在  $k=0.005$  稳定； $T_2 > 1.7$  时，系统均可以保证稳定。具体功角偏差曲线见下图 5-15。图中分别表示在  $T_1=0.1$ ,  $T_2=2.0$ ,  $k=0.005、0.15、0.5、1.0、2.0、3.0、10.0$  时清水川 1J 和安康 1J 间的功角偏差曲线。

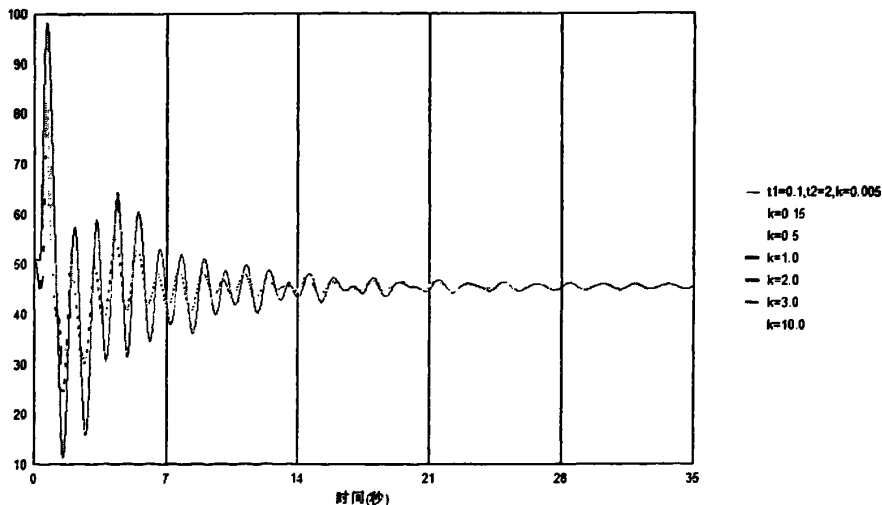


图 5-15 超前-滞后环节超前时  $T_2$  与  $k$  的变化对暂态稳定的影响 ( $T_1=0.1$   $T_2=2.0$ )

Fig 5-15 Advance - delay component in advance  $T_2$  and  $k$  change to transient stabilization influence ( $T_1=0.1$   $T_2=2.0$ )

其次, 增大  $T_1=0.5$ ,  $T_2$  仍取  $0.5\sim 2.5$ ,  $k$  的取值和前面相同。计算结果表明, 当  $T_2 < 1.6$  时, 系统全部失稳;  $T_2 > 1.5$  时, 系统在  $k=0.5$ 、 $0.15$  和  $1.0$  时失去稳定。具体功角偏差曲线见下图 5-16。图中分别表示在  $T_1=0.5$ ,  $T_2=2.2$ ,  $k=0.005$ 、 $0.15$ 、 $0.5$ 、 $1.0$ 、 $2.0$ 、 $3.0$ 、 $10.0$  时清水川 1J 和安康 1J 间的功角偏差曲线。

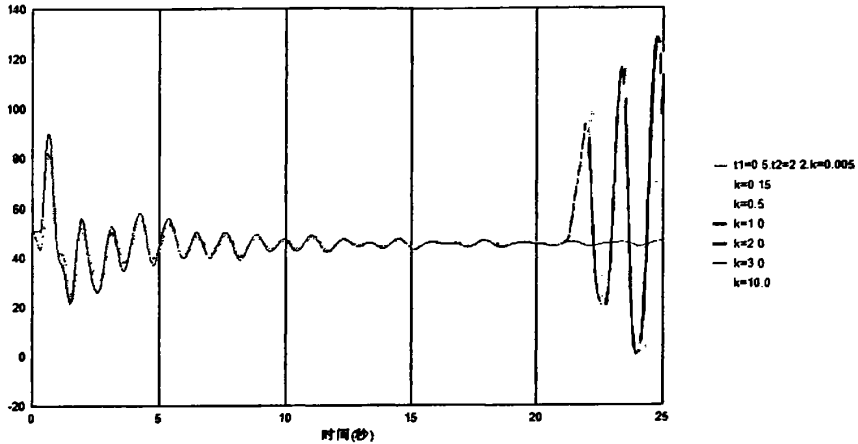


图 5-16 超前-滞后环节超前时  $T_2$  与  $k$  的变化对暂态稳定的影响 ( $T_1=0.5$   $T_2=2.2$ )

Fig 5-16 Advance - delay component in advance  $T_2$  and  $k$  change to transient stabilization influence ( $T_1=0.5$   $T_2=2.2$ )

最后, 继续增大  $T_1$  至  $1.0$ ,  $T_2$  仍取  $0.5\sim 2.5$ ,  $k$  的取值和前面相同。计算结果表明, 当  $T_2 < 2.1$  时, 系统全部失稳;  $T_2 > 2.0$  时, 系统在  $k=0.005$  处系统稳定。具体功角偏差曲线见下图, 图中分别表示在  $T_1=1.0$ ,  $T_2=2.3$ ,  $k=0.005$  时清水川 1J 和安康 1J 间的功角偏差曲线以及  $k=2.0$  时全网功角差和电压、频率曲线。

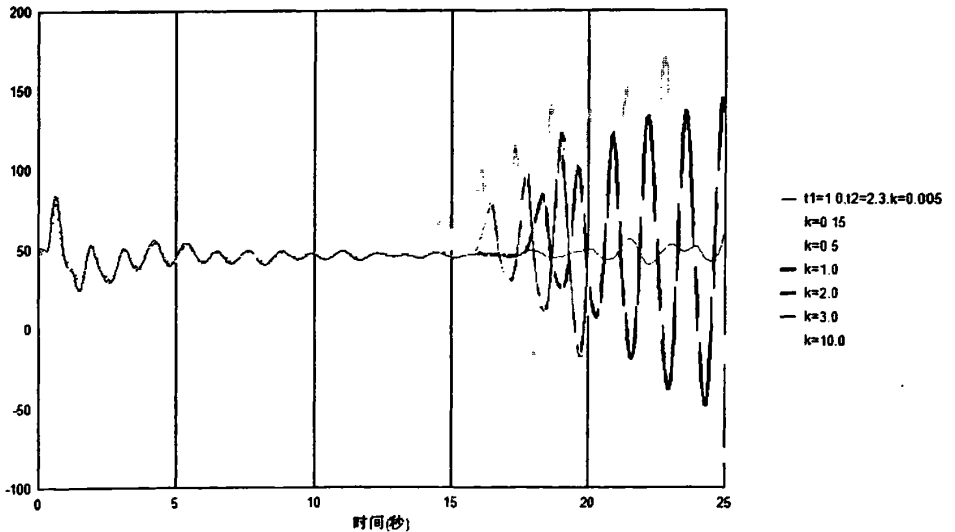


图 5-17 超前-滞后环节超前时  $T_2$  与  $k$  的变化对暂态稳定的影响 ( $T_1=1.0$   $T_2=2.3$ )

Fig 5-17 Advance - delay component in advance  $T_2$  and  $k$  change to transient stabilization influence ( $T_1=1.0$   $T_2=2.3$ )



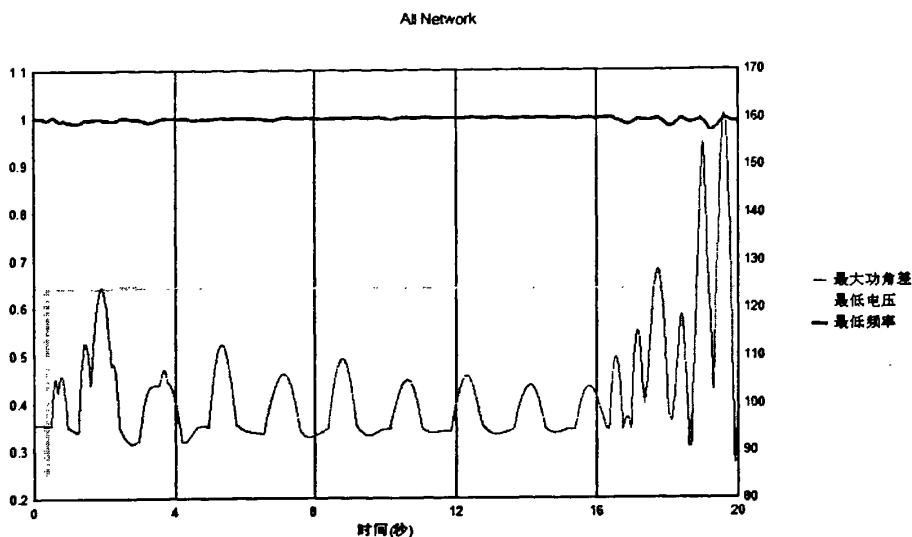


图 5-18 全网最大功角差、最低电压以及最低频率曲线 ( $k=2.0$ )

Fig 5-18 Maximum relative power angles, lowest voltage and lowest frequency curve ( $k=2.0$ )

通过对超前-滞后环处于滞后时的暂态仿真及大量计算可以说明, 当  $T_1$ 、 $k$  选取后,  $T_2$  一般有一个取值范围, 在这个范围内取值, 系统的功角偏差曲线没有很大的变化;  $T_1$  的选择对  $T_2$  取值由很大影响, 不合理的  $T_2$  会使  $T_1$  选不到合适的值以保持系统稳定; 总体而言, 当超前-滞后环节处于滞后时, 可以将  $T_1$ 、 $T_2$  和  $k$  三个参数建立的三维空间划分成几块:  $T_1$ 、 $T_2$  相差较大时系统能够全部稳定区域; 仅在  $k=0.005$  处稳定区域; 在除  $k=0.15$  及  $0.5$  外系统能够稳定区域以及全部失稳区域。这样就非常有利于选择合适的参数组数据放入模型中进行接下来的仿真计算。鉴于对于超前一滞后环节超前和滞后是的分析结果, 在接下来的环节分析中均选择滞后参数。

### c. 不含强迫补偿环节时 TCSC 作用分析

根据前面的分析结果, 可以考虑在榆林-朱家线路上装设 TCSC 装置。因为 TCSC 装置是串联在输电线路中的, 因此从理论上讲无论其装设在榆林侧变电站还是朱家侧变电站对系统的影响都是一样的。故这里以 TCSC 装置装设在榆林侧变电站为例进行分析。图 5-19 给出了用 PSASP 实现的未含强迫补偿环节的综合控制模块图。

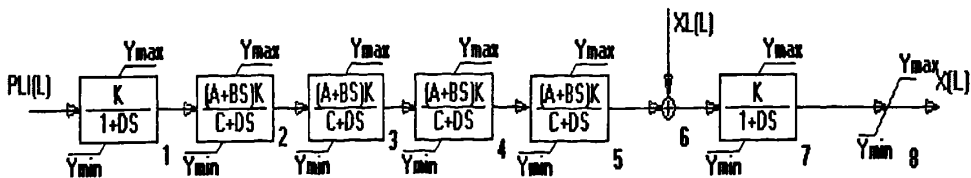


图 5-19 PSASP 实现的不含强迫环节的 TCSC 自定义模型

Fig 5-19 PSASP without force link's TCSC from the definition model

首先假定 TCSC 正常运行时对输电线路的补偿度为 26%。因为输电线路的等效电抗为 0.057775p.u (阻抗基值为 1317.69 Ω)，则正常运行时所补偿的为电容  $X_c = -0.015022p.u$ 。那么 TCSC 控制器的限幅环节  $X_{max} = 0.03004p.u$ ,  $X_{min} = -0.045065p.u$ 。

经过多次仿真计算分析后确定的 TCSC 参数见表 5-3。

表 5-3 补偿度为 26%时的 TCSC 的控制参数 (单位: 秒)

Table 5-3 The compensativity is 26% TCSC controlled variable (the unit: Second)

$T_m$	$T_w$	$T_{tcsc}$	$k$	$T_1 (T_3)$	$T_2 (T_4)$
0.05	3	0.015	0.5	0.2	2.0

这里首先计算榆林-朱家线没有加装 TCSC 装置时的稳定极限。后文的对比计算均用到该结果，仅在该处加以阐述。

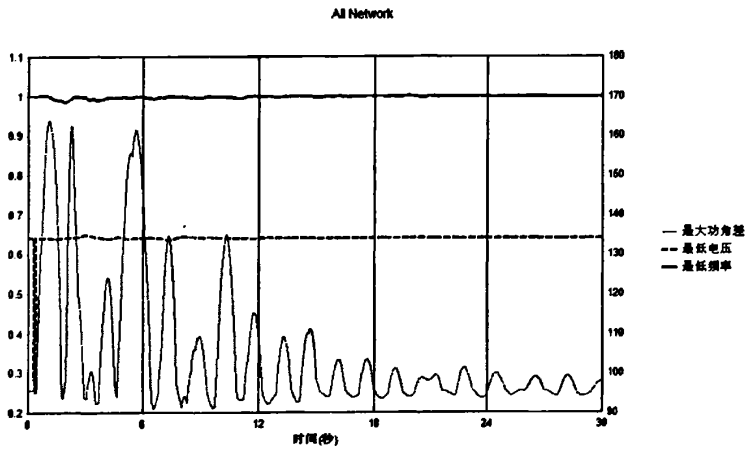


图 5-20 稳定极限点的全网数据曲线图

Fig 5-20 Stable limiting point entire net data diagram of curves

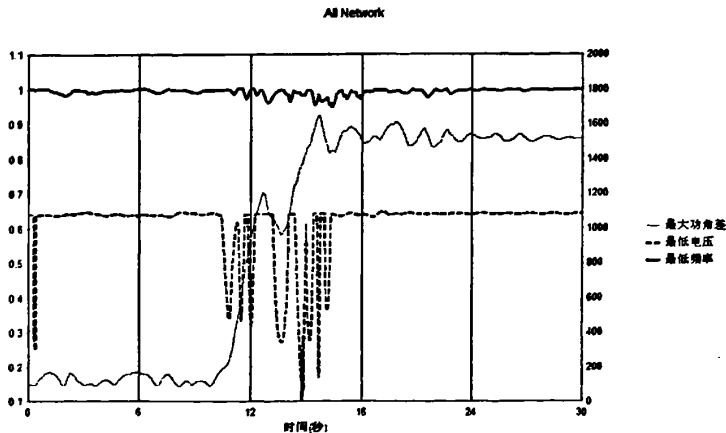


图 5-21 越稳定极限的全网数据曲线图

Fig 5-21 Over the stability limit the entire net data diagram of curves

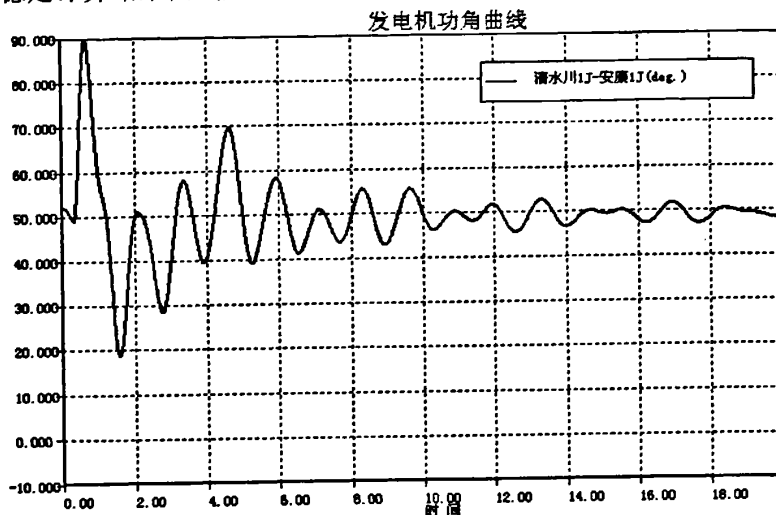
接下来计算榆林—朱家线加装 TCSC 装置时的稳定极限。

表 5-4 稳定极限计算结果 (单位: MW)

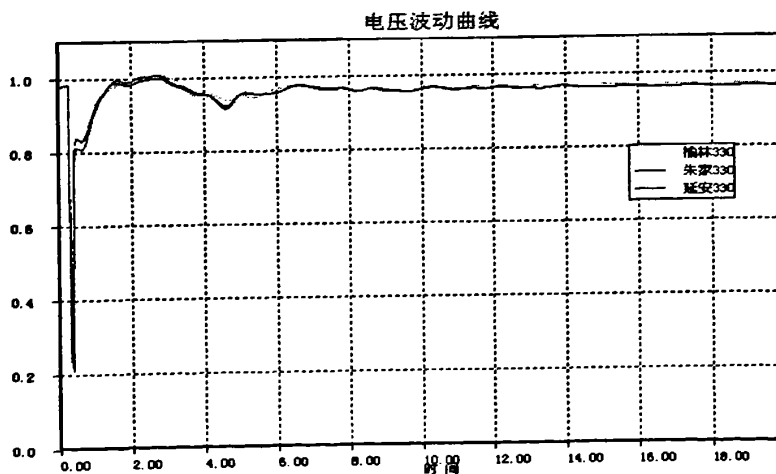
Table 5-4 Stability limit computed result (unit: MW)

不加装 TCSC 榆林—朱家线路功率	加装 TCSC 榆林—朱家线路功率
188.3	214.2

显然, 加装 TCSC 装置控制时的稳定极限是无 TCSC 装置控制时的 1.14 倍, 稳定极限有所提高。稳定计算结果曲线见图 5-22。



a) 功角偏差曲线



b) 电压波动曲线

图 5-22 补偿度 26% 时的暂稳曲线

Fig 5-22 The compensativity is 26% transition condition stable curve

其次假定 TCSC 正常运行时对输电线路的补偿度为 39%。因为输电线路的等效电抗为 0.057775p.u (阻抗基值为 1317.69 Ω)，则正常运行时所补偿的为电容  $X_c = -0.022532p.u$ 。那么 TCSC 控制器的限幅环节  $X_{max} = 0.04506p.u$ ,  $X_{min} = -0.067597p.u$ 。

经过多次仿真计算分析后确定的 TCSC 参数见表 5-5。

表 5-5 补偿度为 39%时的 TCSC 的控制参数 (单位: 秒)

Table5-5 The compensativity is 39% TCSC control variable (the unit: Second)

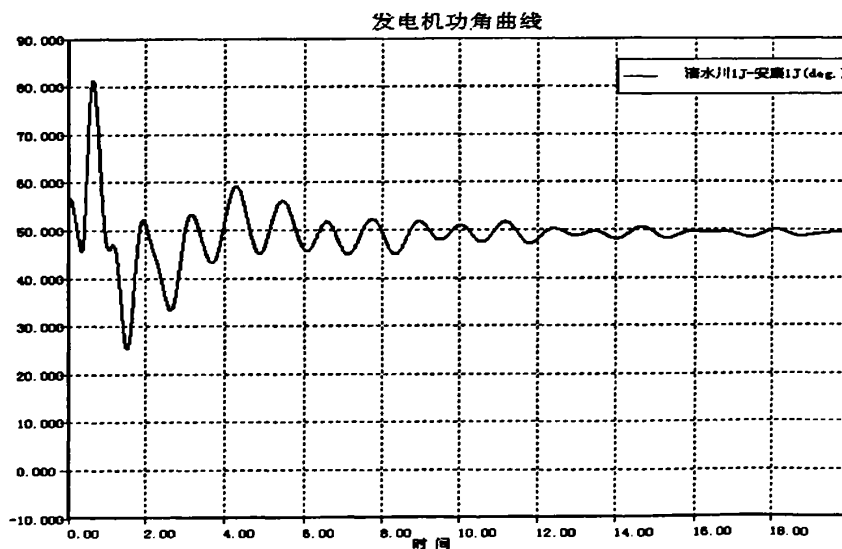
$T_m$	$T_w$	$T_{TCSC}$	$k$	$T_1 (T_3)$	$T_2 (T_4)$
0.05	3	0.015	6.5	0.4	2.3

这里选取未装 TCSC 装置控制时榆林-朱家线路的稳定极限和装设 TCSC 装置时榆林-朱家线路的稳定极限进行对比, 稳定极限见表 5-6。显然, 有 TCSC 装置控制时的稳定极限是无 TCSC 装置控制时的 1.19 倍, 稳定计算结果曲线见图 5-23。

表 5-6 稳定极限计算结果 (单位: MW)

Table 5-6 Stability limit computed result (unit: MW)

不加装 TCSC 榆林-朱家线路功率	加装 TCSC 榆林-朱家线路功率
188.3	223.6



a) 功角偏差曲线

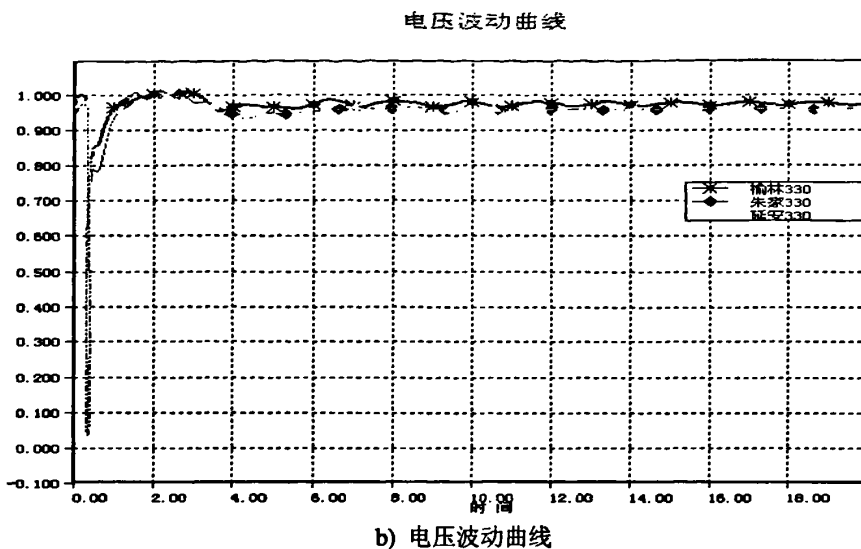


图 5-23 补偿度 39% 时的暂稳曲线

Fig 5-23 The compensativity is 39% transition condition stable curve

最后假定 TCSC 正常运行时对输电线路的补偿度为 50%。因为输电线路的等效电抗为 0.057775p.u.(阻抗基值为 1317.69Ω), 则正常运行时所补偿的为电容  $X_c = -0.02889p.u.$ 。那么 TCSC 控制器的限幅环节  $X_{max} = 0.05778p.u.$ ,  $X_{min} = -0.08666p.u.$ 。

经过多次仿真计算分析后确定的 TCSC 参数见表 5-7。

表 5-7 补偿度为 50% 时的 TCSC 的控制参数 (单位: 秒)

Table 5-7 The compensativity is 50% TCSC control variable (the unit: Second)

$T_m$	$T_w$	$T_{tcsc}$	$k$	$T_1 (T_3)$	$T_2 (T_4)$
0.05	3	0.015	10.5	0.8	2.5

这里选取未装 TCSC 装置控制时榆林—朱家线路的稳定极限和装设 TCSC 装置时榆林—朱家线路的稳定极限进行对比, 稳定极限见表 5-8。显然, 有 TCSC 装置控制时的稳定极限是无 TCSC 装置控制时的 1.33 倍, 稳定计算结果曲线见图 5-24。

表 5-8 稳定极限计算结果 (单位: MW)

Table 5-8 Stability limit computed result (unit: MW)

不加装 TCSC 榆林—朱家线路功率	加装 TCSC 榆林—朱家线路功率
188.3	251.1

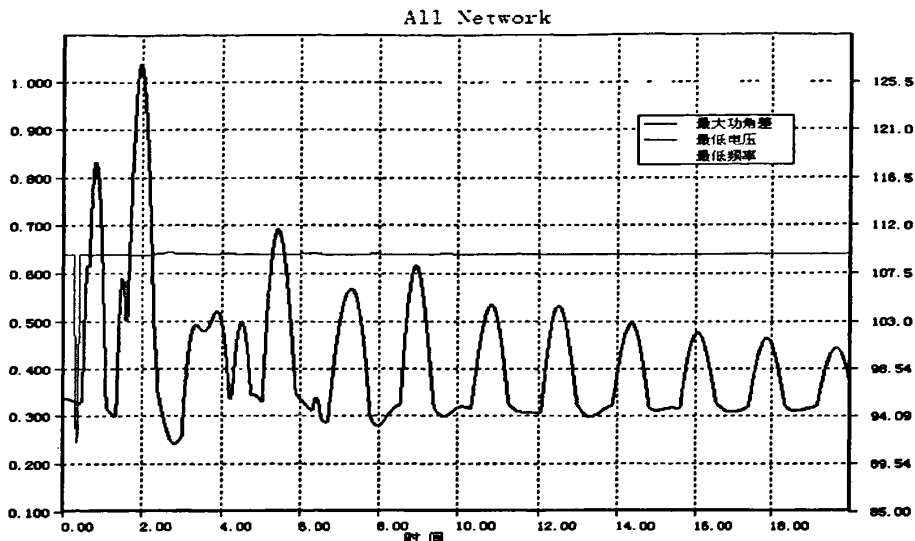


图 5—24 补偿度 50% 时的暂稳曲线

Fig 5—24 The compensativity is 39% transition condition stable curve

d. 强迫环节对系统稳定性的影响

在前面的计算分析中均未考虑 TCSC 综合控制模型中的强迫补偿环节，强迫补偿环节可以在系统发生故障后的前一段时间内产生最大的补偿度，使系统中的同步发电机在第一或第二振荡周期不失步。通过前面计算分析可以发现，当系统失去稳定时，主要是因为第一个振荡周期没有得到很好的控制。因此通过引入强迫补偿环节必然可以进一步提高系统的稳定性。这里以 TCSC 装置正常运行时对输电线路的补偿度是 39% 为例分析引入强迫环节后对系统稳定性和 TCSC 装置参数的影响。用 PSASP 实现的带有强迫补偿环节的综合控制模块图如下。

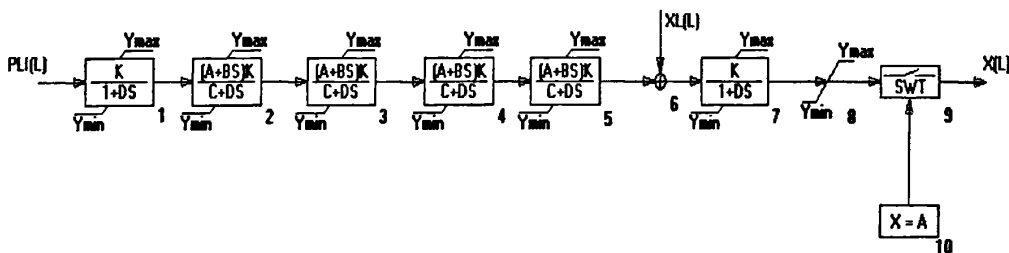


图 5—25 PSASP 实现的不含强迫环节的 TCSC 自定义模型

Fig 5—25 PSASP without force link's TCSC from the definition model

综合控制模型中的参数  $T_m$ 、 $T_w$ 、 $k$ 、 $T_1$  ( $T_3$ )、 $T_2$  ( $T_4$ )、 $T_{TSC}$  按前面多次仿真得到的控制效果优异的参数取值，具体见表 5—9。而  $T_{forced}$  首先从域 {5, 10, 15, 25, 30} 中依次取值。

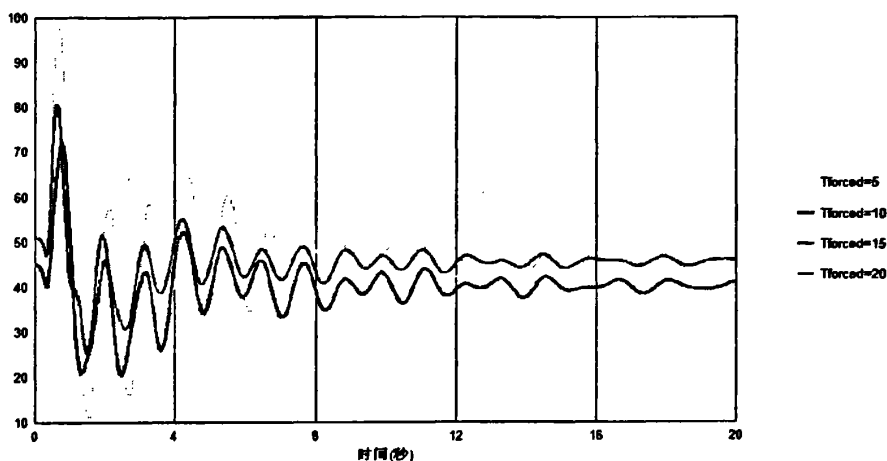
表 5-9 补偿度为 39% 时的 TCSC 的控制参数 (单位: 秒)

Table 5-9 The compensativity is 39% TCSC control variable (the unit: Second)

$T_m$	$T_w$	$T_{tcsc}$	$k$	$T_1 (T_3)$	$T_2 (T_4)$	$T_m$
0.05	3.0	6.5	0.4	2.3	0.015	10

计算结果表明: 在潮流计算结果一致的情况下, 当  $T_{forced} > 25$  时, 在稳定计算中会出现失稳的情况。这就说明: 当引入强迫补偿环节后  $k$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  参数需要重新进行调整, 以保证控制器的参数比较合适, 提高陕北电网向关中电网送电的稳定极限。图 5-26 给出了当  $T_{tcsc}$  小于 25 时的功角稳定曲线。

发电机功角曲线

图 5-26  $T_{forced}$  小于 25 时功角稳定曲线Fig 5-26 The power angle stable curve when  $T_{forced}$  less than 25

显然可以从图 5-26 中看出, 当  $T_{forced}$  小于 25 时, 在强迫补偿环节的作用下, TCSC 装置的控制效果比无强迫补偿环节的控制效果有所增强。而且当  $T_{forced}$  增大到一定程度后, 功角稳定曲线不再发生大的变化。这就说明  $T_{forced}$  对系统稳定性的影响随着  $T_{forced}$  的增大而减弱, 当其达到一定程度后对系统稳定性不再产生影响, 并且当超越极限点时系统将失去稳定。

为了使 TCSC 装置达到更好的控制效果, 在引入强迫补偿环节后需要重新调整 TCSC 装置的 PID 环节参数。这里首先将  $T_{forced}$  设定在 10.0 来研究  $k$  值变化对暂稳情况的影响, 其中  $k$  从域中 {1.0, 4.0, 7.0, 9.0, 12.0} 依次选取。

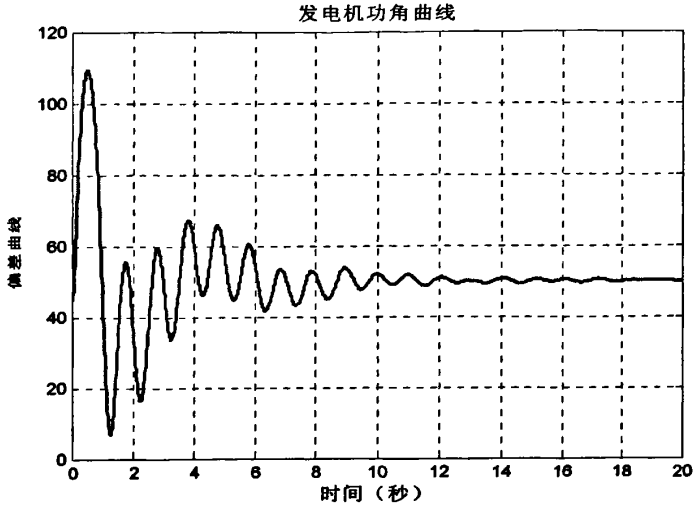


图 5-27  $T_{forced}$  固定 K 值变化时功角稳定曲线

Fig 5-27 The power angle stable curve when  $T_{forced}$  fixed and K change

显然可以看出，虽然  $k$  值在变化，但是功角稳定曲线却吻合在一起。因此可以说  $k$  值的改变对系统稳定性不再有明显的影响了。因此建议在选择合适的  $T_{forced}$  后， $k$  值不需再进行很大的调整，只需要进行校验即可，而且也说明将  $k$  值选在合适的值后其对  $T_{forced}$  参数不再敏感。

保持  $T_{forced}$  和  $k$  及  $T_1$  的大小不变，而  $T_2$  持续增加时，功角稳定曲线见图 5-28；保持  $T_{forced}$  和  $k$  及  $T_2$  的大小不变，而  $T_1$  持续减小时，功角稳定曲线见图 5-29。

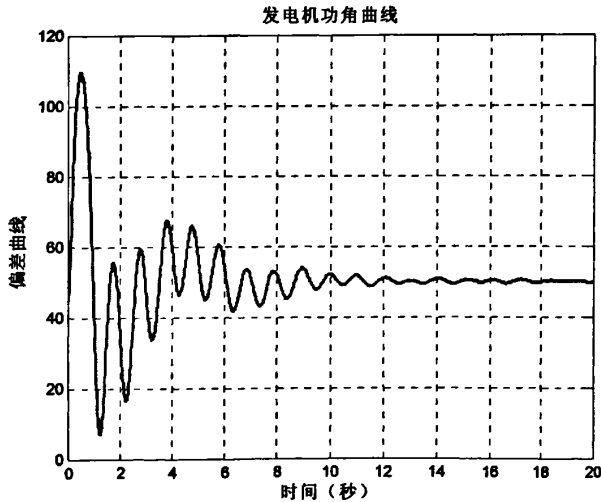


图 5-28  $T_{forced}$ 、 $k$  和  $T_1$  固定时  $T_2$  持续增加时稳定曲线

Fig 5-28 The stable curve when  $T_{forced}$ ,  $k$ ,  $T_1$  fixed and  $T_2$  continues increases



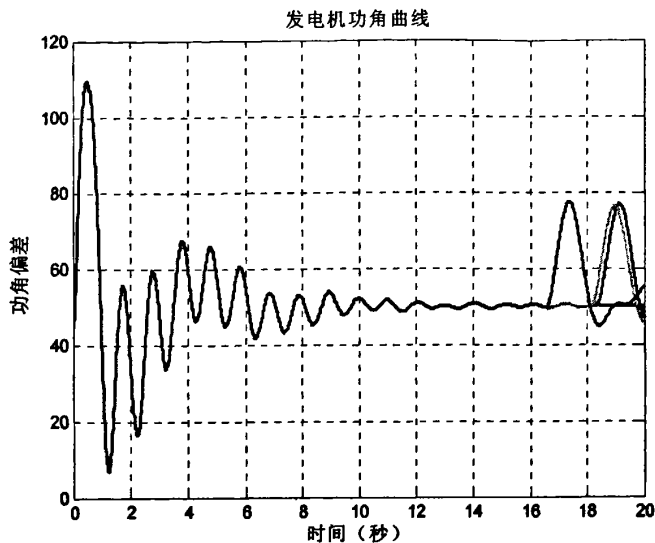
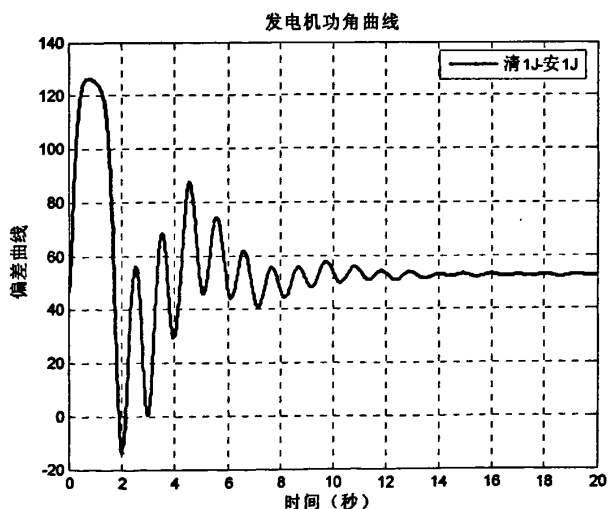


图 5-29  $T_{forced}$ 、 $k$  和  $T_1$  固定时  $T_2$  持续减小时稳定曲线

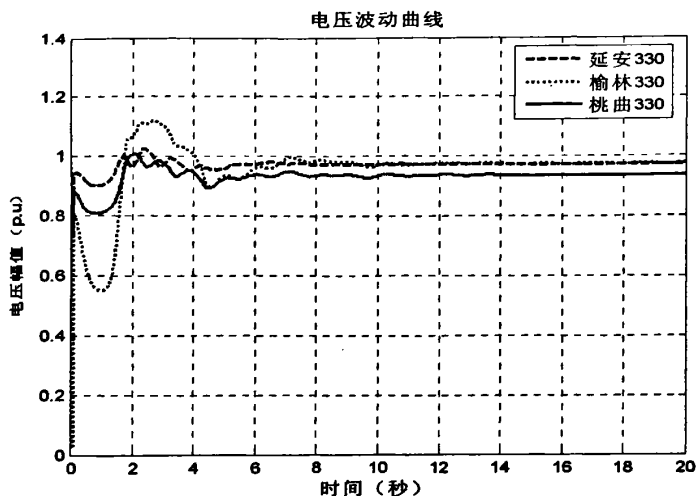
Fig 5-29 The stable curve when  $T_{forced}$ ,  $k$ ,  $T_1$  fixed and  $T_2$  continues reduces

从图 5-29 可以看出, 其他因素不变而  $T_2$  持续增加时对系统稳定性影响不大, 而  $T_2$  持续减小却会使系统的稳定性变差, 因此当选择到合适的  $T_2$  参数后, 最好保持  $T_2$  不变, 更加不能减小。同时  $T_2$  增大却不会影响系统稳定性的原因是此时选择的  $T_2$  已经对  $T_{forced}$  不再敏感。

根据以上计算结论, 这里选取含强迫环节的 TCSC 装置的参数  $T_{forced}$  为 10.0s, 而其他各种参数不再发生变化。此时陕北电网向关中电网送电的稳定极限为 287.3MW, 是原稳定极限的 1.53 倍, 暂态稳定曲线见图 5-30。



(a) 功角偏差曲线



(b) 电压波动曲线

图 5-30 具有强迫环节的 TCSC 装置作用时稳定曲线

Fig 5-30 With forces link's TCSC installment function stable curve

### 5.2.3 仿真结果分析结论

经过理论分析和大量仿真计算可以得到以下结论：

(1) 通过对陕西电网的仿真计算可以看到 TCSC 在提高陕西电网北电南送中所起到的作用非常明显，对解决西电东送的瓶颈问题给出了一个很好的解决方案。通过调节 TCSC 的 PID 控制器的参数可以获得足够阻尼以提高输电线路的暂态稳定极限。

(2) 通过分组搜索参数得到 PID 的如下控制策略：

i. 若 TCSC 装置正常运行对输电线路的补偿度越高，那么 TCSC 装置对系统的稳定极限提高的越多，但是当正常补偿度选择过高时，TCSC 装置的控制参数选择范围就比较小；

ii. TCSC 装置正常运行时的补偿度不同时，TCSC 装置的控制参数也不一样，需要重新确定；当 PID 其他参数 ( $T_m$ 、 $T_w$ 、 $T_{forced}$ ) 发生变化时  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $k$  均需再进行调整；

iii. 在超前一滞后环节处于滞后状态时系统的暂态稳定性比超前一滞后环节处于超前状态时系统的暂态稳定性好；

iv. TCSC 装置中引入强迫环节可进一步提高系统的稳定极限，强迫环节的接入时间长短有一定的限制，需根据具体补偿度通过仿真计算来确定。

## 致 谢

本文是在导师张靠社副教授的悉心指导下完成的,张老师严谨的治学态度和诚恳的待人作风使我受益非浅,不仅在学术方面的研究方法、专业知识方面给予我很多指导,而且在思想教育方面使我大受裨益。在这里我向方老师表示我深切的感谢和崇高的敬意!

论文完成过程中,得到了陕西电力科学研究院电网技术所彭书涛工程师、章海静工程师、张艳丽工程师、王新高工、锁军高工学术上的帮助与支持,使我学到很多知识,积累了宝贵的经验,并在实际工作中得到锻炼;同时还得到了张小庆主任、刘昕副主任等热心同事思想上工作上的鼓励和支持,在此,向电网所给予我帮助和支持的同事们最衷心的感谢!

感谢我的父母对于长久以来的理解和支持!

感谢所有关心、帮助我的老师、同学和朋友们!

## 参考文献

- 【1】 何大愚. 柔性交流输电技术的定义、机遇及局限性[J]. 电网技术, 1996, 20(6): 18~24.
- 【2】 何大愚. 柔性交流输电系统概念研究的新进展[J]. 电网技术, 1997, 21(2): 9~14.
- 【3】 韩英铎, 王仲鸿, 林孔兴等. 电力系统中的三项前沿课题—柔性输电技术, 智能控制, 基于 GPS 的动态安全分析与监测系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997 7(7): 1~6.
- 【4】 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- 【5】 R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 【6】 R. J. Piwko, E. V. Larsen et al. Thyristor Controlled Series Resonance Prototype Installation at Slatt 500kV Substation. IEEE Trans. on Power Delivery [J], Vol. 8, No. 3, July 1993, pp: 1460-1469.
- 【7】 D. J. Trudnowski, M. K. Donnelly, J. F. Hauer. Estimating Damping Effectiveness of BPA's Thyristor Controlled Series Capacitor by Applying Time and Frequency Domain Methods to Measured Response [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 761-766.
- 【8】 R. J. Piwko, C. A. Wegner, S. J. Kinney et al. Subsynchrous Resonance Performance Tests of the Slatt Thyristor-Controlled Series Capacitor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1112-1119.
- 【9】 J. J. Paserba, N. W. Miller, E. V. Larsen et al. Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1471 — 1476.
- 【10】 Krause P, Torgerson D, Renz K, et al. Four year of operational experience of Kayenta advanced series compensation [J]. ICEE 96. Beijing, 1996, pp: 160-165.
- 【11】 Carlos Gama, Brazilian North—South Interconnection Control Application and Operating Experience with a TCSC [J]. Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE, Vol. 2, 1999 pp: 1103 — 1108.
- 【12】 Carlos Gama, Ricardo Tenorio, Improvements for Power Systems Performance: Modeling, Analysis and Benefits of TCSCs [J]. Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Vol. 2, 2000, pp: 1462 — 1467.
- 【13】 Gorge T, Hesse G, Manglick, et al. Options for an Interconnection between the Power System of Queensland and New South Wales [J]. Proceedings of the CIGRE 1993 Regional Meeting South-East Asia and West Pacific, 4-8 October, 1993, Gold Coast, Australia.
- 【14】 郑文斌, 胡国文, 王仲鸿, 伊敏—冯屯输电线 TCSC 动态模拟实验装置的特性研究 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 第 37 卷, 第 7 期, pp: 59—62, 1997.
- 【15】 王永, 毕胜春等. 用 TCSC 改善阳城至淮阴输电系统送电能力的研究 [J]. 电力系统自动化学报, 第 13 卷, 第五期, pp: 43—45, November 2001.

- 【16】孙燕辉, 可控串联补偿(TCSC)动模实验装置的研制与开发[D]. 山东: 山东大学, 2005:15.
- 【17】R.Mohan Mathur, Rajiv K.Varma. 基于晶闸管的柔性交流输电控制装置[M]. 徐政 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- 【18】张津. 可控串联补偿装置的研究现状[J]. 电力情报, 2002, 2:61-63.
- 【19】田杰, 尹建华, 韩祯祥, TCSC 装置的动态特性及其控制策略研究[J]. 电力系统自动化, 第 20 卷, 第 6 期, pp: 34-36.
- 【20】田杰, 尹建华, 可控串联补偿 (TCSC) 的分析研究 (下) TCSC 的触发控制方式对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 第 21 卷, 第 12 期, pp: 34-36.
- 【21】赵学强, 刘建新. 晶闸管控制的串联电容补偿技术[J]. 华东电力, 1999, 5: 1-5.
- 【22】Yong Hua Song, Allan T Johns, Flexible AC transmission systems (FACTS) [J]. IEE, London, United Kingdom, Vol.142, No.4, 1999.
- 【23】E. W. Kimbark, Improvement of System Stability by Switched Series Capacitors [J]. IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-85, No.2, pp. 180-188, FEBRUARY 1966.
- 【24】武守远, 周孝信, 赵贺等. 电力系统新型设备的一种用户自定义建模方法[J]. 电网技术, 1997, 21 (6) .
- 【25】Xiao Ying, Song Y H, Sun Y Z. Power injection method and linear programming for FACTS control[J]. 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore: 2000.
- 【26】Ge SY, Chung T S. Optimal active power flow incorporating power flow control needs in flexible AC transmission systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14 (2) .
- 【27】陈金富, 段献忠, 何仰赞等. 柔性交流输电系统稳态潮流控制分析方法比较[J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (7) .
- 【28】于继来, 柳焯. 基于移相器统一特性的潮流控制[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14 (6) .
- 【29】李庚银, 徐春侠, 律方成等. 含 FACTS 元件的电力系统潮流计算[J]. 华北电力学院学报, 1996, 23 (2) .
- 【30】罗春雷, 孙洪波, 徐国禹等. 含统一潮流控制器的电力系统潮流分析研究[J]. 重庆大学学报, 1997, 20 (1) .
- 【31】电力系统分析综合程序用户手册 (PSASP) 6.0 版[Z]. 中国电力科学研究院, 1999.
- 【32】C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha and H. Ambriz-Perez, A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Networks [J]. IEEE Trans. Power System, Vol.15, No.1, February 2000, pp. 58-64.
- 【33】C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha. A Newton-Type Algorithm for the Control of Power Flow in Electrical Power Networks [J]. IEEE Trans. Power System, Vol.12, No.4, November 1997, pp. 1474- 1480.
- 【34】X. Zhou, J. Liang, Overview of Control Schemes for TCSC to Enhance the stability of Power Systems [J]. IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib, Vol.146, No.2, March 1999, pp: 125-130.

- 【35】 P. S. Dolan, J. R. Smith, W. A. Mittelstadt, A Study of TCSC Optimal Damping Control Parameters for Different Operating Conditions [J]. IEEE Trans. Power System, Vol.10, No.4, November 1995, pp: 1972-1978.
- 【36】 陈菊明, 梅生伟, 刘锋, 多机系统 TCSC 多目标  $H_{\infty}$  控制器设计[J]. 电力系统自动化, 第 24 卷, 第 21 期, pp.11-13.
- 【37】 S. Mei, J. Chen, Q. Lu, Y. H. Song, M. Goto, A. Yokoyama, Nonlinear multitarget  $H_{\infty}$  controller for thyristor-controlled series compensation [J]. IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib, Vol.148, No.6, November 2001, pp: 557-561.
- 【38】 ROUCO. L, PAGOLA, F. L, An eigenvalue sensitivity approach to location and controller design of controllable series capacitors for damping power system oscillations [J]. IEEE Trans. Power System, Vol.12, No.4, 1997, pp: 1660-1666.
- 【39】 CHEN. X. R, PAHALAWATHTHA. N. C, ANNAKAGE. U. D, KUMBLE. C. S, Controlled series compensation for improving the stability of multi-machine power systems [J]. IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib, Vol.142, No.4, 1995.
- 【40】 Kwang M. Son, Jong K. Park On the LQG Control of TCSC for Damping Power System Oscillations [J]. IEEE Trans. Power System, Vol.15, No.4, 2000, pp. 1306-1312.
- 【41】 X. X. Zhou, J. Liang, Nonlinear adaptive control of TCSC to improve the performance of power systems [J]. IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib, Vol. 146, No. 3, 1999.
- 【42】 N. Ramarao, Daniel K. Reitan, Improvement of Power System Transient Stability Using Optimal Control: Bang—Bang Control of Reactance [J]. IEEE Trans. Power Apparatus and System, Vol. PAS-89, No. 5/6, pp. 975- 984, May/June 1970.
- 【43】 D. N. Kosterev, W. J. Kolodziej, R. R. Mohler, W. A. Mittelstadt, Robust Transient Stability Control Using Thyristor-Controlled Series Compensation [J]. Proc. of the 4-th IEEE Conference on Control Applications, Albany, NY, August 1996, pp: 215—220.
- 【44】 Dmitry N. Kosterev, Wojtek J. Kolodziej, Bang—Bang Series Capacitor Transient Stability Control [J]. IEEE, Trans. Power System, Vol. 10, No. 2, pp: 915-924, May 1995.
- 【45】 Xiaobo Tan, Luyuan Tong, Naiyao Zhang, zhong dong Yin, Dongxia Zhang, zhong hong Wang, A Fuzzy Control Scheme for Thyristor Controlled Series Compensation in Transients of Power Systems [J]. Proceedings of IEEE International Conference on Power System Technology, Beijing, 1998, pp: 441-445.
- 【46】 NOROOZIAN. M., Andersson.G, Damping of power system oscillations by use of controllable components Power Delivery [J]. IEEE Transactions on , Vol.9 Issue: 4, Oct 1994, pp:2046—2054.
- 【47】 郭强, 刘晓鹏, 吕世容, 夏道止. 多机系统可控串联补偿电容 (TCSC) 非线性控制器 [J]. 电力系统自动化, 第 22 卷, 第 4 期, pp24—26, April 1998.
- 【48】 曹路, 李海风, 陈珩, 戴先中, 何丹, 张腾. 用于 TCSC 阻抗控制的变参数 PID 方法 [J]. 电

- 力系统自动化, 第 23 卷, 第 24 期, pp7-10, December, 1999.
- 【49】 D. Jiang, X. lei, A nonlinear TCSC control strategy for power system stability enhancement [J]. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on advances in Power System Control ,Operation and Management, APSCOM 2000, Hong Kong, October 2000, pp. 576-581.
- 【50】 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制 [J]. 科学出版社, 1999 年 3 月。
- 【51】 E. Lerch, D. Povh, X. wang, H. J. Haubrich. A study of TCSC optimal damping for different operating conditions [J]. IEEE Trans. Power System, Vol.10, No.4, pp. 1972-1978, November 1996.
- 【52】 Scott G. Helbing, G. Gkarady. Investigations of an Advanced Form of Series Compensation [J]. IEEE Trans. Power Delivery, Vol.9, No.2, pp. 939-947, April 1994.
- 【53】 Gama C A et al. Prospective Application of Advanced Series Compensation to Improve Transmission System Performance [J]. CIGRE, 1994.
- 【54】 John J. Paserba, Nicholas W. Miller, Einar V. Larsen, Richard J. Piwko. A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis [J]. IEEE. Trans. Power Delivery, Vol.10, No.3, pp. 1471-1478, July 1995.
- 【55】 E. V. Larsen, K. Clark, S. A. Miske, Jr. Urbanek. Characteristics and Rating Considerations of Thyristor Controlled Series Compensation [J]. IEEE PES Paper 93- SM- 433- 3- PWRD. Vancouver, British Columbia, July 1993.
- 【56】 夏道止. 电力系统分析(下册) [M]. 中国电力出版社, 1998.
- 【57】 P. KUNDUR. Power System Stability and Control [J]. McGraw-Hill, Inc., pp. 813-814,1994.
- 【58】 段来越, 史可琴等. 西北电网二零零七年运行方式[M].西北电力调度通信中心, 2005.
- 【59】 段来越, 史可琴等. 2007 年西北电网发电机参数库[M]. 西北电力调度通信中心, 2006.
- 【60】 段来越, 史可琴等. 2007 年西北电网计算手册[M]. 西北电力调度通信中心, 2006.
- 【61】 张世学, 刘信民等. 2007 年陕西电网运行方式[M]. 陕西电力调度通信中心, 2007.

## 附录

攻读硕士期间发表的论文及社会评价

基于区域分布的中压配电网无功规划—陕西电力；文章被评为陕西电力公司科技论文奖；

参与了陕西省电力公司“十一五”无功规划科技项目；

榆林压气站二期供电方案研究项目。