

可控串联补偿（TCSC）对输电线路继电保护影响的研究

摘要：可控串联补偿电容器可以解决系统中的某些稳定性问题，可控串联补偿电容器是实现交流系统灵活输电的重要组成部分。TCSC 装置的作用是利用可控硅控制触发角口的改变对电容器进行旁路、投入或部分的调节，可令 TCSC 装置快捷平滑地调节串接于输电线路中的有效容抗值，以致达到提高系统传输能力，灵活控制系统中的潮流，改善系统的暂态稳定性等目的。本论文通过分析大电网系统中有一系列问题，说明了在电网中采用 TCSC 的必要性，同时也在综合考虑了 TCSC 的结构特点、谐波特性及动态基频阻抗特性的基础上，分析了含串补电容补偿线路的工作特性，同时着重分析了 TCSC 对输电线路继电保护的影响，其中主要包括 TCSC 对距离保护的影响。

关键词：可控串补，继电保护，距离保护，低频电流分量

目 录

摘要	3
Abstract	3
引言	4
1 国内外研究现状	4
1.1 FACTS 技术及其国内外研究现状	4
1.2 TCSC 及其国内外研究现状	4
1.3 TCSC 对继电保护的影响及研究现状	5
1.4 本论文所做的工作	5
2 TCSC 的结构特点及性质分析	6
2.1 TCSC 的结构特点	6
2.2 TCSC 的工作原理	6
2.3 TCSC 的运行模式	7
2.4 TCSC 的基本特性解析式	8
2.5 TCSC 的特性	9
2.5.1 TCSC 的谐波特性	9
2.5.2 TCSC 的阻抗特性	10
3 TCSC 的仿真	10
3.1 未加入 TCSC 的简单单相电力系统模型	10
3.2 单相 TCSC 模型的建立	13
3.3 包含单相 TCSC 电力系统的模型	14
3.4 单相电力系统的仿真比较	14
4 TCSC 对输电线路继电保护的影响	17
4.1 TCSC 对距离保护的影响	17
4.1.1 TCSC 动态基频阻抗对输电线路距离保护的影响	17
4.1.2 TCSC 的谐波特性对距离保护的影响	18
4.1.3 TCSC 对故障分量距离保护的影响	19
4.2 TCSC 对电流差动保护的影响	23
4.3 TCSC 对纵联保护的影响	24
4.4 TCSC 对阻抗方向保护的影响	25
4.5 TCSC 输电线路对继电保护的配置要求分析	26
5 结论	26

引言

1 国内外研究现状

1.1 FACTS 技术及其国内外研究现状

如今电力电子元件容量向着大功率和高电压方向发展，涌现了一类为契合电力系统向远距离、大容量输电，需要一种对其本身参数快速控制的设备——柔性交流传输设备 (Flexible AC Transmission Systems, 简称为 FACTS)，技术以电力电子技术与现代控制理论为基本，具备对交流输电系统参数和网络结构的轻便快捷控制的功能。此技术的出现很好地完善了输电网运行与发展中种种困难的全面要求，在控制电网潮流、提高系统稳定性以及传输容量方面带来了可行性的解决开端，因此受到业界广泛认可。FACTS 是 80 年代末，这个概念由美国电力研究所 (EPRI) 的 N.G.Hingorani 博士总结得出。他第一个关于 FACTS 的定义就是：柔性交流输电系统，也就是 FACTS 是在晶闸管的控制器的集合，其中有移相器、静止无功补偿器、动态制动器、可控串联电容调节器及带载调压器与故障电流限制器等。领域内学者也加入研究，不断丰富 FACTS 概念。更甚，在 FACTS 概念的指导下，新的 FACTS 设备，如 TCSC、以可关断器件为基础的 STATCOM 和 UPFC 等也相继问世，进而反育这一概念本身^[1]。

FACTS 的概念一经提出就受到了业界的广泛关注，并被业界具备权威性的相关技术研究者和工作组认定为“现代电力系统中具有翻天覆地意义的前沿性课题之一”，其为解决现代电力系统问题提供了一种极为有效的解决方法。

国外研制并应用 FACTS 装置的速度较快，从 1960 年以后即开始使用 SVC，而应用在输电电压控制中则自 1970 年末期开始，并应用在对输电线路电压控制及提高系统的稳定性上。例如，在 1980 年，日本三菱公司研制出第一台以晶闸管为基础的静止同步补偿器 (STATCOM) 容量为 $\pm 20\text{Mvar}$ ；1991 年日本在 Inuyama 换流站增设了一台 480Mvar 的静止无功发生器；1992 年，德国的西门子公司研发并在美国西部电力局 (WAPA) 投运首台由晶闸管控制的串联电容器 (TCSC) 装置；1995 年，美国的福纳西约翰城的 Sullivan 变电站 (500kV/161kv) 安装了一台 $\pm 100\text{Mvar}$ 的静止无功发生器；德国西门子公司研发的 4500/3000A 门极可关断晶闸管 $\pm 8\text{Mvar}$ 静止无功发生器也在 1997 年 4 月在丹麦运行；2001 年，美国纽约电力局投运可转换静止补偿器的第一阶段，即 4-200Mvar 的 STATCOM^[2]。

我国在 FACTS 的研发开始的比较晚，但是政府对 FACTS 相关方面的研制给予帮助，各方面研究已步入正轨，并且已经取得了一定的成绩。

1.2 TCSC 及其国内外研究现状

可控串联电容补偿器 (TCSC) 作为一个关键 FACTS 元件，与别的串联型 FACTS 器件相比，可控串补 (TCSC) 较为简便，并且能有效地解决一些常规固定串补中存在的技术问题，如系统功率振荡、次同步谐振 (SSR) 及动态潮流控制等。而因此

,可控串补得到广泛的应用。

我国关于 TCSC 的研究也是起步较晚,随着我国 750kV 与 1000kV 电网的发展,可控串补技术正向着更大容量、更高电压方向发展。在国网公司“十一五”科技规划中,把 750kV 和 1000kV 串补与可控串补技术发展加入其中,与此同时,在国网公司“十一五”新技术纲要中,将 750kV 串补作为新技术应用重点项目加入其中。2003 年 6 月,南方电网在 500kV 天生桥-平果双回线平果变电站投运了由西门子公司制造的基于 TCSC 的串补装置,这是我国投入运行的第一个 TCSC 工程项目,天广线 TCSC 工程的投产提高了线路输电能力,为“西电东送”工程增加大约 300MW 的输电容量,极大改善了系统的暂态稳定及阻尼功率振荡^[3]。

2005 年,由我国科学家大力研发的首套具有我国自主知识产权的 TCSC 装置在甘肃壁口-成县 220kV 线路投运,其额定容量为 75.2MVar,基本容抗是 21.7Q,以上代表着我国成为世界上第四个可以自主研发可控串补装置的国家。在 2007 年,全世界可控补偿容量最大、运行环境最复杂的具有中国特色的超高压可控串补装置—伊冯 500 千伏可控串补装置成功运行;2008 年,中国电科院主力承担的三堡东三 I、II 线 500 千伏进口串补装置控制保护系统创新改造成功^[4]。

1.3 TCSC 对继电保护的影响及研究现状

在传统的电力系统中作为被保护对象的参数,比如输电线路的阻抗、发电机常数及变压器的额定参数等,通常这些是已知的。串补电容的加入使输电线路阻抗参数发生变化,一度给线路保护带来某些问题,但已经得到良好的解决,这些内容将在后文详尽地说明。在含有 FACTS 元件的系统中,因 FACTS 元件的串联阻抗或者并联阻抗都随着系统的运行方式不同而不同,故障会产生谐波和暂态分量,则其幅值和频率也会因为不同的元件和故障位置而变化,这些因素不仅给传统保护的整定带来难题,甚至也向传统的保护理论整体提出了挑战,继而难免对继电保护性能带来影响。

为了解决因 FACTS 元件引起的电力系统继电保护问题,美国 EPRI 在 90 年代初提出了想法,开始对 FACTS 元件和 FACTS 电力系统继电保护和相关策略的研究。第一步工作即是分析现有保护系统在 FACTS 系统中的应变能力并提出相应的整改方法,如果现有的保护系统不能适应 FACTS 系统要求,提出专门应对 FACTS 系统的继电保护的客观要求。第二步则是研发适合 FACTS 系统的特殊保护。在现有保护系统的改进和新型保护的研发中,数字化技术及现代通信技术等将起到重要的作用。可控串联电容补偿器(TCSC)具有巨大的潜在经济性和性能效益,从系统保护的立场来看,它又可能是十分艰巨的,在各国的 FACTS 实践中均将此首选作为实用化装置。迄今为止,由西门子、GE、ABB 公司与相关电力系统合作,已成功研发了多套 TCSC 装置并在美国投入运行,例如 WAPA 电力系统 Kayenta 变电站的 ASC 工程(1992)和 BPA 电力系统 Slatt 变电站 TCSC 工程(1993)等。

1.4 本 论 文 所 做 的 工 作

本论文通过分析和研究大电网系统中一直存在的难题，基于综合考虑 TCSC 的结构特点与谐波特性和动态基频阻抗特性，分析了 TCSC 对输电线路继电保护的影响，其中着重说明了 TCSC 对距离保护的影响及其对电流差动保护的影响，再进一步说明了 TCSC 对负序、零序功率方向元件的影响及 TCSC 对纵联保护的影响等。最后本论文还对 TCSC 在系统中的影响进行仿真验证。本文主要工作和研究内容包括如下几个方面：

(1)、分析和研究了可控串补(TCSC)的结构特点、谐波特性及动态基频阻抗特性。

(1)、分析了 TCSC 对线路继电保护的影响,主要包括了 TCSC 对距离保护的影响、对电流差动保护的影响及纵联保护的影响。并分析了 TCSC 输电线路对继电保护的配置要求分析。

2 TCSC 的结构特点及性质分析

2.1 TCSC 的结构特点

一般地说，TCSC 模块由电容和与其并联的电感即双向可控硅对构成，见图 2-1 所示。TCSC 中过电压保护可分为两部分，一为无间隙 MOV 放电器的保护，一为利用 TCSC 的可控硅控制的电抗器提供的过负荷保护^[5]。利用可控硅控制电抗器可以大为减少并联电容器设备中对 MOV 放电器的依赖，并且可以提高系统的整体性能及其适应性。在系统未发生故障时，通过 TCSC 电感的电流波形在每一个周期之间关于电容电压过零点对称。TCSC 可以控制触发脉冲来使晶闸管触发角发生变化，进而使其控制的电感支路电流大小发生变化，实现其可以使总等效电抗变化。当触发角在 145° 到 180° 之间时，等效电抗表现出容性；在 90° 到 140° 之间时，等效电抗表现出感性。此种特性让它具有在系统故障时减小短路电流的功能。每一个 TCSC 模块都可分成三种运行模式，也就是可控硅阻断(未导通)、可控硅旁路(完全导通)，微调控制模式。

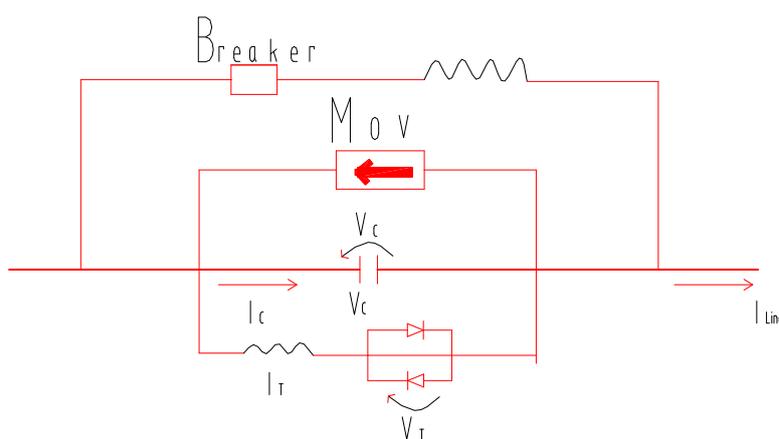


图 2-1 TCSC 结构图

2.2 TCSC 的工作原理

TCSC 装置中晶闸管阀的关断与导通两个状态随两个拓扑结构间互相转换。定义 α

为触发延迟角,它表示电容电压过零点到晶闸管开始导通时刻之间的电角度差; β 是触发超前角,它表示晶闸管导通时间相比之电压过零点的超前时间, $\alpha + \beta = 180^\circ$ 。 δ 定义是晶闸管导通区间的电气角度,在系统无故障时, $\delta = 2\beta^{[6]}$ 。

当可以控制的串联补偿处于微调的控制时,电容器组电压 U_c 、双向晶闸管 TCR 的触发角 α 、导通角 δ 及电感电流 i 的理想波形如图 2-2 中所示。

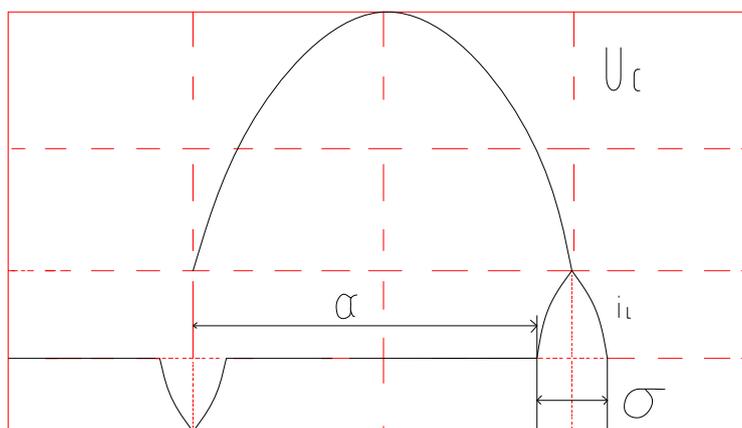


图 2-2 微调时理想波形图

定义 ω_0 是 TCSC 的自然角频率, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$;

ω_0 与电网基波频率 ω 的比值为 K , $K = \omega / \omega_0$, $K^2 = X_c / X_L$;

X_c 与 X_L 分别是固定串补电容 C 与晶闸管控制电抗器 L 的基波容抗与基波感抗。

2.3 TCSC 的运行模式

现实运行情况下, TCSC 的工作模式一般分为以下四种:

(1) 当晶闸管处于闭锁时,这个时候晶闸管触发角是 180° , TCSC 与普通串补没有差别。

(2) 在容抗调节模式下,这种模式时, $\alpha_{on} \leq \alpha \leq 180^\circ$, TCSC 的容抗值在它的最小值和最大值之间可以调节。此时 TCSC 处于正常运行模式,暂态时我们能通过增大容抗值来提高补偿度,进而改善系统的暂态稳定性;动态时我们可以控制它的阻抗来降低系统的振荡;在稳态中,我们可以调节容抗值大小让系统潮流分布更合理,进而减少损耗。

(3) 在感抗调节的情况下, $90^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{crit}$, 此时 TCSC 作为一个感性可以调节的电抗。在这个状态下,线路谐波比较大,给系统的安全和运行的经济性带来影响。这种模式一般不用。

(4) 在旁路模式下,晶闸管触发角是 90° , TCSC 因旁路电感和串联电容是并联关系,而感抗很小,可以用晶闸管旁路方式来降低 TCSC 过电压、减小短路电流,并且减轻 MOV 的负荷,降低 MOV 能耗。用串补电容电压假设为理想正弦,得到 TCSC 仿真接线图如下。

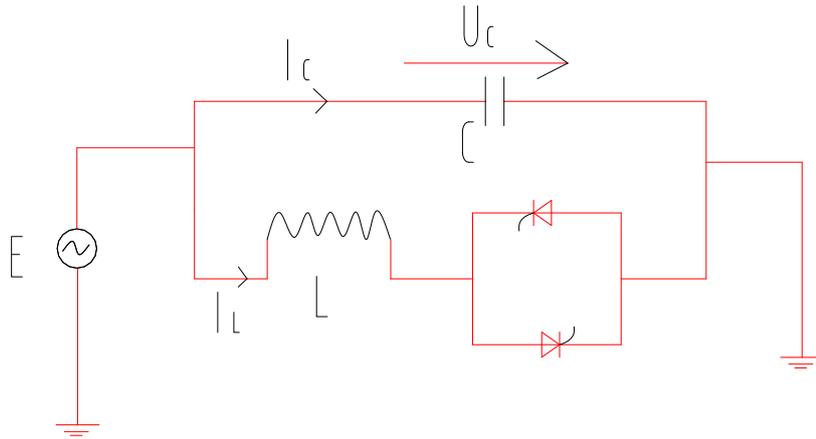


图 2-3 TCSC 接线仿真图

2.4 TCSC 的基本特性解析式

把 TCSC 加入计算，依据其不同的运行模式列出微分方程如下：

(1) 晶闸管关断状态

$$C \frac{dV_c}{dt} = i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2-1)$$

其中, I_m 为线路电流峰值, V_c 电容上电压, φ 支路电流初始相位角

(2) 晶闸管导通状态

$$C \frac{dV_c}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (2-2)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c(t) \quad (2-3)$$

以上, i_L 为 TCR 支路电流, L 是 TCR 支路总电感, 运用拉式变换, 可计算得以下:

$$V_c(s) = I_M \left[\frac{I_m e^{j\varphi}}{j\omega C} \left(\frac{1}{S - j\omega} \right) \right] + \frac{V'_{c0}}{s} \quad (2-4)$$

$$I_L(s) = I_M \left[I_m e^{j\varphi} \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \left(\frac{1}{S - j\omega} - \frac{S = j\omega}{S^2 + \omega_0^2} \right) \right] + \frac{C\omega_0^2 V''_{c0}}{S^2 + \omega_0^2} \quad (2-5)$$

$$V_c(s) = I_M \left\{ I_m e^{j\varphi} \left[\left(\frac{1}{S - j\omega} + \frac{S}{S^2 + \omega_0^2} \right) - \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \frac{1}{S - j\omega} - \frac{S + j\omega}{S^2 + \omega_0^2} \right] + \frac{sV''_{c0}}{S^2 + \omega_0^2} \right\} \quad (2-6)$$

以上, V'_{c0} 就是晶闸管关断时刻电容上电压, V''_{c0} 是晶闸管导通时刻电容上电压,

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ 将上式拉式反变换可得:

$$V_C(t) = \frac{I_m}{LC} \cos \varphi + \frac{I_m}{LC} (\sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega t) + V_{c0}' \quad (2-7)$$

$$i_L(t) = I_m \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \left[\sin \varphi (\cos \omega t - \cos \omega_0 t) + \cos \omega t (\sin \varphi - \frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 t) \right] + C \omega_0^2 V_{c0}'' \sin \omega_0 t \quad (2-8)$$

$$V_C(t) = I_m \frac{\omega L \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \left[\sin \varphi \left(\frac{\omega}{\omega_0} \sin \omega_0 - \sin \omega t \right) - \cos \varphi (\cos \omega_0 - \cos \omega t) \right] + V_{c0}' \cos \omega_0 t \quad (2-9)$$

并联电容支路电流为:

$$i_C(t) = i(t) - i_L(t) \quad (2-10)$$

到现在,我们将描述 TCSC 基本特性的解析表达式计算出来了。如果借此延伸,我们可以进而导出稳态、暂态下 TCSC 装置的基波阻抗和各次谐波阻抗公式。

TCSC 可以在快速改变它的基频等效阻抗的大小及性质来完成在系统中的上述控制作用。这里出现的基频等效阻抗其实是由电容器以及可控电抗器也就是 TCR 构成的 TCSC 电路在系统中工作时,频率为 50Hz 时的基频时的等效阻抗, TCSC 的基频等效阻抗如下:

$$X_{TCSC} = \frac{1}{\omega C} - \frac{A}{\pi \omega C} (2\sigma + \sin 2\sigma) + \frac{1}{\pi \omega C} \frac{4A}{k^2 - 1} \cos^2 \sigma (k \tan k - \tan \sigma) \quad (2-11)$$

$$\text{以上: } A = \frac{1}{k^2 - 1}; k = \frac{\omega_0}{\omega}; \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

2.5 TCSC 的特性

稳态运行状况下,理论上讲,TCSC 会产生主要由串联电容和电感支路所组成的 LC 回路中产生环流的谐波电流,但此谐波电流对系统波形有很小的畸变影响,尽管在电容上的电压畸变率很大,但在常见电力系统稳态运行状况下,测量电压中所占比重很小,所导致的各节点电压畸变率比较小,所以,以上产生的谐波不会影响继电保护装置。

2.5.1 TCSC 的谐波特性

试验得出,TCSC 除了在关闭 TCSC 本身,工况变化中线路电流谐波会一定程度的增大,但是波形畸变率不影响系统正常运行,而且也不会特别影响线路继电保护。在短路时,谐波特性即与有无串补有紧密关系,还与 TCSC 触发角、故障点和故障时刻等因素有关。串联补偿线路劣势也较为突出,普通线路与之相比,串补线路电压、电流畸变率较小,而电压畸变率差别更明显,普通线路各次谐波单调衰减,而串补线路的各次谐波都振荡下降。TCSC 的各次谐波受故障点、故障时刻和触发角等各种因素的影响,但是这些因素所引发

的谐波变化比较于基波来说是很小的。而故障以后 TCSC 对故障的与普通线路不同的反应会引起线路电流变化和 TCSC 上电压谐波成分的改变。

2.5.2 TCSC 的阻抗特性

(1) TCSC 的稳态基频阻抗特性

在正常运行时, TCSC 处在微调控制运行模式下, 此时 TCSC 为容性阻抗。若电流没有大到可以使 MOV 触发, TCSC 的基频阻抗只和触发角相关。当 TCSC 线路处于短路故障时, TCSC 在一段复杂的扰动后, 又会恢复到稳定状态。在 TCSC 电容没有被旁路时, 若短路时电流足够大, 从而使 MOV 触发, 那么 TCSC 的阻抗与触发角和短路电流的大小都有关。

(2) TCSC 的动态基频阻抗特性

如今业界已对 TCSC 的各种特性进行了深入的研究, 在其动态基频阻抗特性方面, 目前研究工作的重点是 TCSC 稳态基频阻抗。TCSC 的动态基频阻抗在分析 TCSC 在线路继电保护中有何影响意义重大。

TCSC 的动态基频阻抗, 等同于 TCSC 在暂态运行过程中其本身的等效基频阻抗。稳态条件下, TCS 的电压和通过其的电流都按正(余)弦规律, 而当在系统出现故障之后的暂态时, 以上所述两个电气量除了包含基频分量, 还有衰减的直流分量和谐波分量。如果系统中加入了 TCSC, 那么在其线路上发生故障, MOV 能对串联电容器起到过负荷保护的作用, 在故障电流高到一定的程度, MOV 过负荷保护进一步触发晶闸管, 使其在输电线路增加一个电感元件, 让 TCSC 处于旁路模式, 让故障电流尽量较小。若故障后 TCSC 未能旁路, 它的动态基频阻抗幅值按时间先下降后上升, 在升到顶点时又会下降并最终达到稳定值, 整体为一个超调过程。而如果 TCSC 能在故障正确出现旁路, 短路后一个周波, TCSC 的动态基频阻抗按时间衰减再次下降到一个稳定值。正常运行时, TCSC 处在微调控制模式, TCSC 的动态基频阻抗为容性, 阻抗角为负 90° , 它的基频阻抗只和触发角有关。正常情况下, 在容性变化范围内, 基频阻抗的减小会引起 MOV 饱和程度加重, TCSC 基频阻抗中的阻抗改变程度要大过其电抗, 因此虽然阻抗角变小了, 而阻抗值却变大了。当 TCSC 处于未旁路, 如果这时短路电流比较大, 令 MOV 触发, 使 MOV 变为对动态基频阻抗产生影响的一个关键原因。如果 MOV 的初始电压比较低, 则故障发生之后 MOV 容易被触发, MOV 的饱和程度越深, MOV 对动态基频阻抗产生影响的程度越大。相反, 如果 TCSC 未旁路, 则在同一短路类型下, 短路点离 TCSC 越近, TCSC 的动态基频阻抗幅值越小。

3 TCSC 的仿真

论文使用 MATLABPSB 建立典型的简单电力系统的模型, 然后开始仿真, 因为 MATLAB PSB 里没有 TCSC 模型, 所以之后构造搭建了 FACTS 装置中的 TCSC 模型, 在简单电力系统的基础上加入 TCSC, 研究 TCSC 对系统运行性能的影响, 最终利用 SIMULINK 进行稳态仿真, 输出负载电压、有功无功功率的波形的对比图, 从而分析

TCSC 对电力系统的影响。

3.1 未加入 TCSC 的简单单相电力系统模型

简单的电力系统由电源、变压器、输电线路、负载构成。可简化成下图：



图 3-1 简单电力系统简化图

在 MATLAB 中的 PSB 模块，画出简单电力系统模型如下：

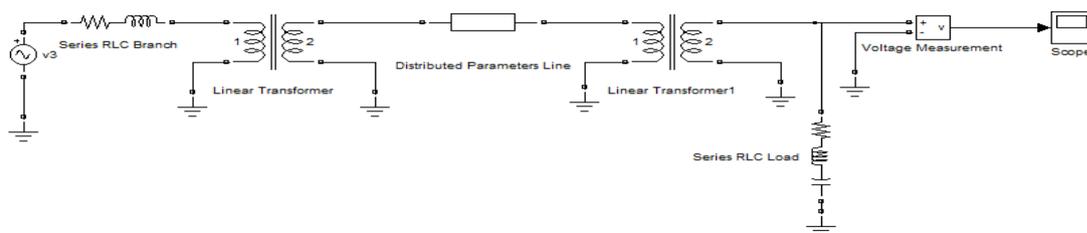
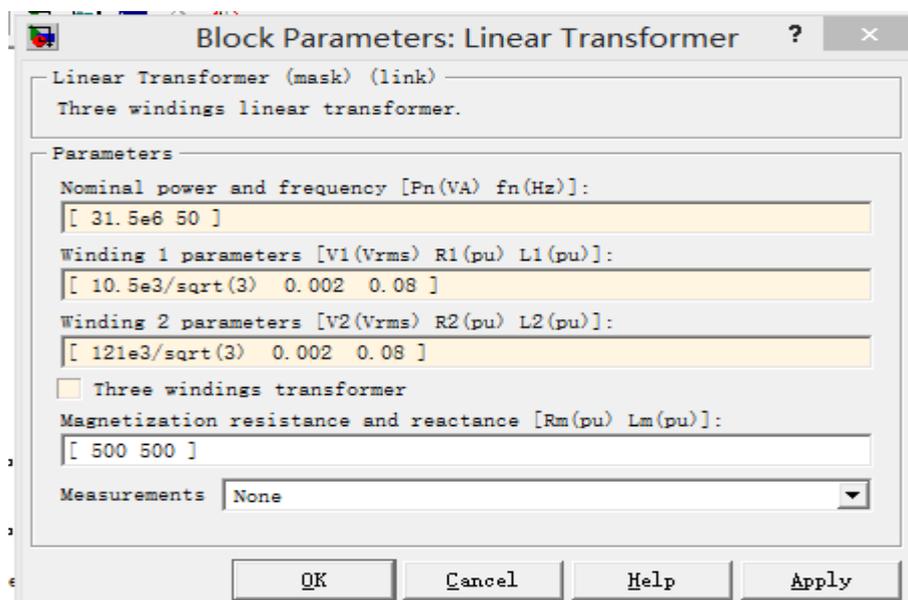


图 3-2 简单单相电力系统模型

系统参数设置为：(1) 电源是单相电压源，峰值是 10.5kV，频率是 50Hz。电压源内阻等效为 $R=0.001$ 欧， $L=0.05$ mH。

升压变压器的参数：系统中的升压变压器及降压变压器变比分别是 10.5/121 和 110/6.3。详细参数见下图。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/448001105052006124>