

可控串补动模装置研制 及阻抗特性研究

郑旭,裴志宏,孙海顺,王少荣

(华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要:提出了可控串联补偿器 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation) 动模装置的设计方案,给出了系统接线及主电路配置,并介绍了系统核心部分即控制保护系统的实现。利用数值仿真程序和所研制的动模装置对 TCSC 的稳态及动态阻抗特性进行了研究,重点分析了以电容电压和线路电流作为同步信号时的阻抗阶跃特性。提出闭环阻抗控制,用以改善以电容电压为同步信号时 TCSC 的阻抗阶跃特性。通过动模试验对其结果进行了验证。

关键词:可控串联补偿器;动模实验;阻抗特性;闭环控制

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)05-0050-04

0 引言

可控串联补偿器 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation) 是柔性交流输电系统 (FACTS) 中投入实际应用较早并有着很好前景的一种 FACTS 元件。通过调节晶闸管的触发脉冲,它可以平滑而迅速地改变输电线路的阻抗;可以用于改善网络潮流分布,提高输送功率;降低短路电流;提高暂态稳定极限,改善动态性能;阻尼功率振荡,抑制次同步谐振^[1]。这些都为远距离交流输电提供了很好的技术手段。

本文介绍了所研制的 TCSC 动模试验系统的整体设计方案和实现,并利用数值仿真程序和动模装置对 TCSC 的阻抗特性进行了研究。最后,针对以电容电压同步时阻抗动态特性不太理想的情况,提出了闭环阻抗控制。动模实验结果表明加入闭环控制后,TCSC 的阻抗特性得到了很好的改善。

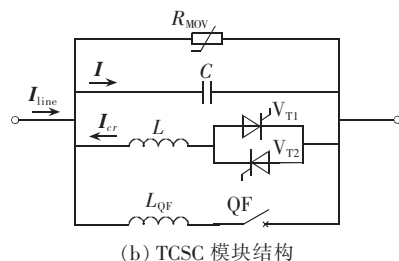
1 TCSC 动模试验系统接线及主电路配置

TCSC 试验系统原理接线如图 1(a) 所示,其中 TCSC 模块结构如图 1(b) 所示。它主要由串联电容器 C 、反并联晶闸管模块 V_{T1} 和 V_{T2} 、晶闸管控制电抗器 L 、氧化锌压敏电阻 (R_{MOV})、保护用旁路断路器 QF 几个部分组成。

TCSC 主电路参数针对模拟 3 种线路长度的试验系统选取,选取原则为每种线路长度自然谐振频率 K 相同,且 $K=2.33$ p. u.,同时保证每种线路长度的串补度范围基本相同,即基本串补度为 25%,可控范围为 25%~75%。各种线路长度对应的主电路参数见表 1。



(a) TCSC 试验系统原理接线图



(b) TCSC 模块结构

图 1 TCSC 动模试验系统

Fig.1 Schematic diagram of TCSC test system

表 1 线路长度对应的主电路参数

Tab.1 The parameters of main circuitry corresponding to line lengths

l/km	z/Ω	z'/Ω	$C/\mu\text{F}$	L/mH
300	84.72	18.66	680(4.68 Ω)	2.5(0.79 Ω)
400	112.96	24.88	510(6.24 Ω)	3.4(1.07 Ω)
600	169.44	37.32	340(9.37 Ω)	5.1(1.60 Ω)

注: l 为线路长度; z 为线路阻抗; z' 为模拟线路阻抗; C 为电容器参数; L 为电抗器参数。

2 TCSC 动模系统整体方案

TCSC 动模试验系统整体方案如图 2 所示。信号接口模块主要完成信号调理及触发脉冲的隔离驱动等功能;控制保护模块主要实现各种控制算法和保护算法以及对晶闸管的脉冲触发;录波模块主要功能是记录 TCSC 本身及线路的运行状态;通信模块将整个试验平台各个部分有机地连接在一起,并负责上传录波数据和下传控制指令等;监控给用户提供了良好的人机接口,用户可以通过监控计算机获取 TCSC 装置的运行状态及其参数和远方 TCSC 系统下发控制指令。

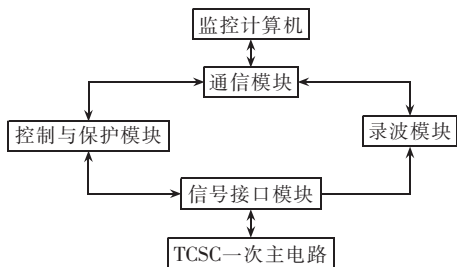


图 2 TCSC 模拟试验系统整体结构

Fig.2 The structure of TCSC physical simulation system

3 控制保护系统实现

由于整个试验系统的核心是控制保护系统,因此本节主要介绍控制保护系统的实现。控制保护系统的结构如图 3 所示。

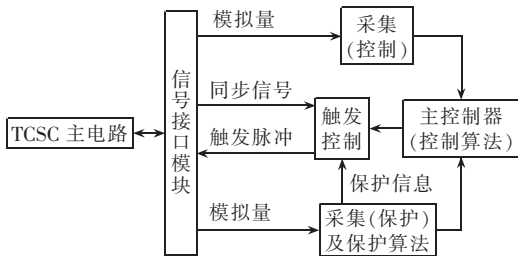


图 3 控制保护系统结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of control and protection system

控制保护系统以工控机为主控制器,其 CPU 芯片选用 Intel Celeron 处理器(主频为 1.0 GHz),其主要功能是实现各种控制算法;采集、保护和触发控制部分均以自行设计的板卡以插卡方式(ISA 总线)与工控机接口,一起构成整个试验系统的核心。

3.1 主控制器

主控制器主要是实现控制策略或控制算法进而达到各种控制目标。主控制器的输入信号主要由控制采集部分提供,较常用的控制输入信号一般是线路电流或者线路功率^[2]。

控制算法的输出为命令触发角^[3],控制算法只需将计算所得的命令触发角的大小数值输出到触发控制模块,触发控制模块自动完成信号的逻辑判断、同步及其脉冲形成。

3.2 数据采集

控制保护系统的数据采集部分是利用一种基于 ISA 总线及 DSP 的数据采集卡对电容器电压、电容器电流、电抗器支路电流、线路电流、三相线路电压、 R_{MOV} 电流以及各个触点的开合状态等模拟量和开变量进行采集,为控制算法和保护算法提供输入。

DSP 利用定时器中断实现定时数据采集,每周期采样 24 点,然后每过 0.01 s,也即每过半周期的时间对采样结果进行离散傅里叶变换分析,求出每个采集通道的基波和 3 次、5 次谐波分量,再由主控制器通过 ISA 总线将计算结果读到内存中。

3.3 触发控制

TCSC 的触发控制与系统的动态特性有很大的关系,准确可靠的触发控制是系统正常稳定工作的基础。它涉及到 TCSC 的运行方式、同步信号的选择、触发角度和其他保护信息等多方面的内容。触发控制由数字触发卡实现,其结构如图 4 所示。数字触发卡根据主控制器的输出完成同步触发和各种逻辑闭锁功能。

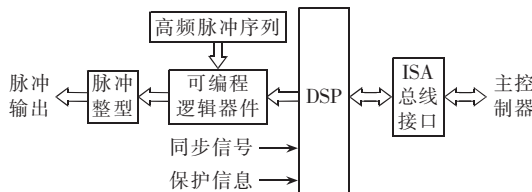


图 4 数字触发卡结构图

Fig.4 Schematic diagram of digital trigger

数字触发卡采用 TI 公司的电机控制专用 DSP TMS320F 240 和可编程逻辑器件等实现。触发控制采用分相控制的方式,以同步信号的过零时刻为基准启动计数器设置触发时刻,并采用双边沿触发,即在同步信号的一个周期内捕获 2 次过零点,以向上过零时刻开始计算第 1 个脉冲触发延时,即触发角 α_1 ;以向下过零时刻开始计算第 2 个脉冲触发延时,即触发角 α_2 。

除了正常方式下输出触发脉冲外,由可编程逻辑器件还可实现晶闸管旁路(Bypass)和晶闸管阻断(Block)运行方式。当需要进入 Block 模式时,由脉冲输出逻辑封锁晶闸管脉冲;而当需要进入 Bypass 模式时,由脉冲输出逻辑产生高频脉冲序列,使晶闸管连续导通。这 2 种运行方式不需要同步信号的参与,工作稳定可靠,不受外界环境的影响^[4]。

3.4 保护

本套 TCSC 动模装置配置了软件保护和硬件保护。软件保护由保护卡实现,硬件保护则由安装的 R_{MOV} 实现。

保护卡可以进行电容器过电压保护、电抗器过电流保护。保护卡结构与数据采集卡结构相同,由 DSP 处理器对采集得到的电容器电压、电流和电抗器支路电流进行监视,并根据保护算法^[5]产生保护信息送到数字触发卡上,进而产生保护动作。

系统也装配了 R_{MOV} 以实现硬件保护。 R_{MOV} 是利用半导体材料具有非线性伏安特性原理制成的,当其承受的电压低于某一定值时,电阻很大;而当承受的电压高于该值时,其电阻显著减小。因此,当电容器电压超过 R_{MOV} 动作电压后, R_{MOV} 的阻值将急剧减小,电流从 R_{MOV} 处分流,从而将电容电压钳制在安全电压以下,保护电容器不被损坏。

4 实验结果及分析

TCSC 的阻抗特性是 TCSC 的基本特性,也是其

最重要的特性, TCSC 正是可以连续调节其自身阻抗才达到改善电力系统特性的目的。本节通过数值仿真及动模装置对 TCSC 的阻抗特性进行了研究。

4.1 稳态基波阻抗

TCSC 基波阻抗理论计算公式^[6]如下:

$$X_{\text{TCSC}} = \frac{1}{\omega C} - \frac{A}{\pi \omega C} \{ 2(\pi - \alpha) + \sin[2(\pi - \alpha)] \} + \frac{1}{\pi \omega C} \frac{4A}{K^2 - 1} \cos^2(\pi - \alpha) \times \{ K \tan[K(\pi - \alpha)] - \tan(\pi - \alpha) \} \quad (1)$$

式中 α 为晶闸管触发角; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$; $K = \omega_0/\omega$; $A = K^2/(K^2 - 1)$ 。

对应 600 km 线路长度(参数选择见表 1), 则有 $C = 340 \mu\text{F}$, $K = 2.33$, $A = 0.526$ 。根据式(1)可以得到 TCSC 基波阻抗理论计算曲线, 如图 5 中实线所示。

试验系统如图 1 所示, 模拟 600 km 线路长度。调节晶闸管触发脉冲, 使本套装置的 TCSC 模块在容性微调区内运行, 进行多次稳态动模试验, 得到如图 5 中虚线所示的 TCSC 基波阻抗的动模试验曲线。

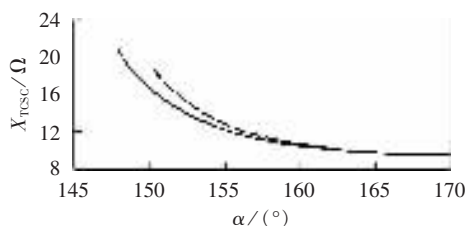


图 5 TCSC 阻抗特性曲线

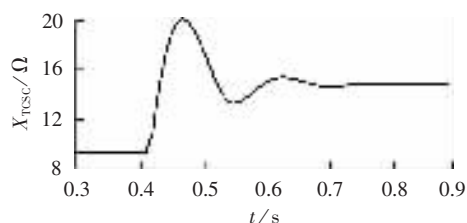
Fig.5 Resistance characteristics curves of TCSC

由以上结果可以看出, 动模试验所得曲线与理论计算曲线非常接近。两者略有误差, 是由于理论计算不计晶闸管导通时动态电阻和管压降、晶闸管支路电感线圈的电阻以及串补电容的介质损耗等^[7]。

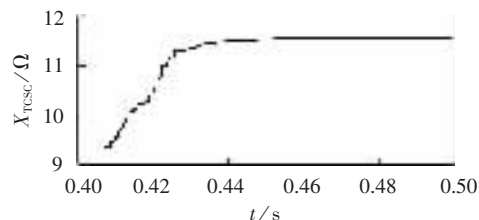
4.2 阻抗阶跃特性

试验系统及参数同 4.1 节。分别以 EMTDC 数值仿真和本套动模装置进行阻抗阶跃的实验, 结果如图 6、图 7 所示。其中, 图 6(a) 和图 7(a) 分别为以电容电压为同步信号时, 触发角从 180° (对应 $X_{\text{TCSC}} = 9.1 \Omega$) 阶跃到 152° (对应 $X_{\text{TCSC}} = 15.0 \Omega$) TCSC 基波阻抗变化的仿真波形和动模试验结果; 图 6(b) 和图 7(b) 分别为以线路电流为同步信号时, 触发角从 80° (对应 $X_{\text{TCSC}} = 9.15 \Omega$) 阶跃到 60° (对应 $X_{\text{TCSC}} = 11.8 \Omega$) 的仿真波形和动模试验结果。

由 EMTDC 仿真波形和动模试验波形可以看出, 以电容电压为同步信号时阻抗的阶跃会发生较大的超调和振荡, 且需经过较长的时间 TCSC 阻抗才会基本达到稳态。以线路电流为同步信号时, 阻抗特性以类似一阶惯性环节的趋势在很短的时间内便进入了稳态。此试验结果也证实了文献[8]的结论。



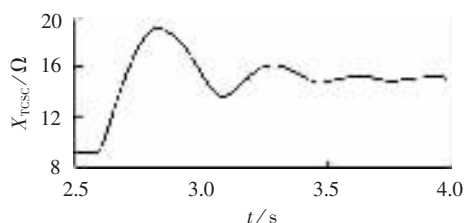
(a) α 从 180° 阶跃到 152° (电容电压同步)



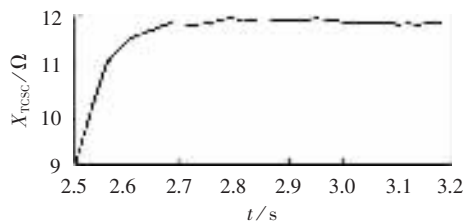
(b) α 从 80° 阶跃到 60° (线路电流同步)

图 6 阻抗阶跃响应的仿真波形

Fig.6 Step response of EMTDC simulation



(a) α 从 180° 阶跃到 152° (电容电压同步)



(b) α 从 80° 阶跃到 60° (线路电流同步)

图 7 阻抗阶跃响应的动模波形

Fig.7 Step response of dynamic simulation

4.3 电容电压同步时阻抗阶跃特性的改善

以电容电压为同步信号时, 阻抗阶跃特性不太理想, 于是本节提出了针对阻抗的闭环控制。在这个控制器中, 误差是命令阻抗和实际测量的 TCSC 阻抗之间的差值, 每周周期测量阻抗 2 次。该控制器采用 PI 调节器, 如图 8 所示。选择增益 $K_p = 0.05$, $K_i = 0.02$, 并对 PI 调节器的输出进行限幅, 使 TCSC 在正常的容性区调节并避开谐振区。由于引入了测量阻抗与命令阻抗之间的误差作为反馈量进行修正, 因此可以加快 TCSC 阻抗变化, 改善其动态过程。

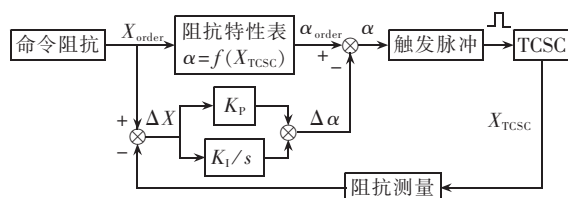


图 8 闭环阻抗控制

Fig.8 Close loop control

图9给出了以电容电压为同步信号,使触发角从 180° 阶跃到 152° 时,加入闭环阻抗控制之前(实线)和之后(虚线)动模实验的阻抗变化曲线。

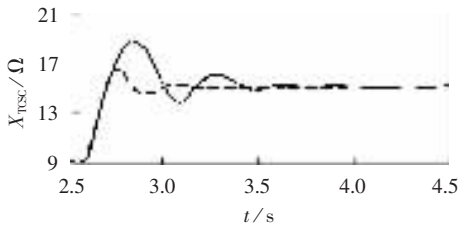


图9 闭环阻抗控制对阻抗特性的改善

Fig.9 Improvement of resistance characteristics with close-loop control

由图可以看出,加入闭环阻抗控制后,TCSC基波阻抗的动态特性大为改善,阻抗的过调和进入稳态的时间大大减小了。

5 结论

a. 动模试验结果表明所研制的 TCSC 动模实验系统性能可靠,能稳定运行并完成实验的研究内容。

b. 以电容电压为同步信号时,阻抗特性会发生超调和振荡;而以线路电流为同步信号时,阻抗特性以类似一阶惯性环节的趋势在较短的时间内便能进入了稳态。因此,以线路电流作同步信号时系统运行较为良好。

c. 针对以电容电压同步时阻抗动态特性不太理想,提出了闭环阻抗控制。动模实验结果表明加入闭环控制后,TCSC 的阻抗特性得到了很好的改善。

参考文献:

- [1] 武守远,周孝信,李亚健,等. 可控串补控制器的物理模型设计与基本特性试验[J]. 电网技术,1998,22(6): 21-25.
WU Shou-yuan, ZHOU Xiao-xin, LI Ya-jian, et al. Design and experiments of the controller for analog model of thyristor controlled series compensation [J]. **Power System Technology**, 1998, 22(6): 21-25.
- [2] 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特性的影响[J]. 电力系统自动化,1997,21(12): 34-36.

TIAN Jie, YIN Jian-hua. Investigation of the thyristor controlled series compensation (II): The effect of TCSC firing control schemes on the system performance[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1997, 21(12): 34-36.

- [3] 张采. 可控串联电容补偿非线性 PID 控制器[J]. 电网技术, 1999, 23(10): 14-18.
ZHANG Cai. A nonlinear PID controller for TCSC [J]. **Power System Technology**, 1999, 23(10): 14-18.
- [4] 尹忠东. 基于暂态稳定控制的 TCSC 装置特性研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 19-25.
YIN Zhong-dong. Research on characteristics of TCSC device based on transient stability control [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1999, 23(6): 19-25.
- [5] 胡玉峰,尹项根,陈德树,等. 可控串补(TCSC)本体保护原理、配置及实现研究[J]. 继电器, 2003, 31(7): 28-33.
HU Yu-feng, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al. The study in protection theory, disposition and realization of TCSC device [J]. **Relay**, 2003, 31(7): 28-33.
- [6] 徐政. 可控串联补偿装置的稳态特性分析[J]. 电力电子技术, 1998, (2): 32-35, 31.
XU Zheng. Steady state characteristics analysis of thyristor controlled series compensation [J]. **Power Electronic Technology**, 1998, (2): 32-35, 31.
- [7] 杨勇,解大,刘晓冬,等. 可控串联补偿装置动态模拟实验研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 18-21, 56.
YANG Yong, XIE Da, LIU Xiao-dong, et al. Research on TCSC dynamic system simulation [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1999, 23(4): 18-21, 56.
- [8] HELBING S G, KARADY G G. Investigation of an advanced form of series compensation [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1994, 9(2): 939-947.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

郑旭(1979-),男,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向为电力系统仿真和电力系统控制(E-mail: hustzx987@tom.com);

裴志宏(1976-),男,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为电力系统负荷建模。

Design and implement of dynamic simulation system of TCSC and study on resistance characteristics

ZHENG Xu, PEI Zhi-hong, SUN Hai-shun, WANG Shao-rong

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation) dynamic simulation system is designed and its system wiring and main circuitry configuration are presented. The implementation of the control and protection subsystem, as its core, is introduced. The steady and dynamic resistance characteristics of TCSC are analyzed with EMTDC simulation and physical simulation, and its step characteristics with capacitive voltage and line current respectively as its synchronization signal are emphasized. A close-loop control is put forward to improve the step characteristics of TCSC with capacitive voltage as its synchronization signal. Its effects is proved by the dynamic simulation.

Key words: TCSC; dynamic simulation; resistance characteristics; close-loop control