

可控串联电容补偿动态 模拟实验装置设计

姚伟,杨毅,孙海顺,文劲宇,程时杰

(华中科技大学 电力安全与高效湖北省重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一套可控串联电容补偿 TCSC(Thyristor Controlled Series Compensation)动态模拟装置的设计方案。装置分为控制保护、录波和远程监控 3 个单元,每个单元中的插件都是一个完成单一任务的功能模块,各功能模块均是由双口 RAM 交换接口进行数据交换,通过工控机的 ISA 总线相连组成一个整体,采用这种硬件结构装置的实时性、可靠性和扩展性得到了极大的提高;控制保护单元和录波单元通过集线器与远程监控单元相连,同时控制保护单元和录波单元也有各自的监控界面,方便进行就地调试和监控。装置采用分层设计,中上层控制策略用 C 语言编程实现,易于进行各种控制策略和保护的研究。利用所研制的实验装置,分别在电容电压同步方式和线路电流同步方式下,进行了 TCSC 的基频阻抗特性实验。实验结果表明,该 TCSC 实验装置能够快速调节阻抗,并能灵活地完成不同阻抗模式之间的切换。

关键词: 可控串联电容补偿; 动态模拟; 动模试验; 基频阻抗阶跃响应

中图分类号: TM 761

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)12-0076-05

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)概念提出后第一种进入实际应用的 FACTS 装置^[1]。通过调节晶闸管的触发脉冲相位,可以连续、快速、大范围地改变其阻抗,从而可以动态调节输电线路的潮流;提高系统的稳定性;阻尼系统的低频振荡和抑制次同步谐振,同时,在特殊的运行方式下还可以显著减少系统的短路电流,降低直流偏移电压,保护串联电容器^[2-5]。

电力系统的动态模拟试验是研究电力系统特性的基本方法之一,和数字仿真相比,它的最大特点就在于能够更真实地反映系统的物理特性,实验结果更为可靠。目前研究 TCSC 的主要方法是数字仿真^[4-10],因此研制 TCSC 实验装置并进行相应的电力系统动态模拟试验具有重要的理论和实际意义^[11-13]。

在此介绍了笔者研制的 TCSC 动模实验装置,包括装置整体、控制保护单元和故障录波单元的设计原则及其实现。这套装置采用硬件模块化设计,采用分层控制的方法实现装置的控制,控制算法易于实现,还备有完善的录波和远程监控功能。能较为方便地利用该装置进行 TCSC 的相关实验研究。同时,因为装置的设计和实现以实际工程应用装置为原型,所以它的成功研制具有一定的实用价值和工程指导意义。

1 TCSC 主电路结构及其运行参数

所设计的单相 TCSC 模块主电路结构如图 1 所示,主要包括电容 C 、电感 L 、双向晶闸管 V_{T1} 和 V_{T2} ,金属氧化物可变电阻器 R_{MOV} ,旁路晶闸管接触器 KM。其中旁路接触器主要是使 TCSC 能够工作在晶闸管被旁路的状态,这个状态不同于晶闸管被高频脉冲触发导通的 TCSC Bypass 状态,将 TCSC 的这种运行状态称为硬旁路状态,TCSC 在启动前和保护动作的时候运行于这个状态。此外,为了防止在暂态的过程中 TCSC 电容过压和晶闸管过流,还设置了触发脉冲闭锁(Block)和高频脉冲触发(Bypass)2 个与同步信号无关的特殊运行状态^[11]。

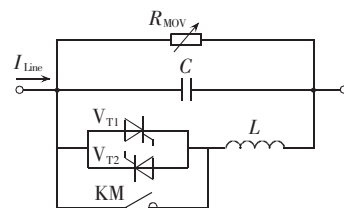


图 1 单相 TCSC 模块主电路结构图

Fig.1 Main circuitry of single phase TCSC module

TCSC 装置的主电路运行参数如表 1 所示。

2 TCSC 控制保护装置设计

2.1 TCSC 控制保护装置总体设计

所研制 TCSC 装置的控制保护系统整体结构如图 2 所示。

霍尔传感器部分主要是完成对需要测量的电

表 1 TCSC 装置的运行参数
Tab.1 Operating parameters of TCSC equipment

参数名称	参数值
基本串补度	25 %
阻抗调节范围	-2.11 Ω(感性)~+28.6 Ω(容性)
额定电流	8.66 A
额定电压	245 V
电容	338 μF(9.4 Ω)
并联电抗器	5.5 mH(1.73 Ω)
三相容量	2.15 kvar/相
三相短路最大峰值电流	43.2 A
晶闸管最大峰值电流	185 A

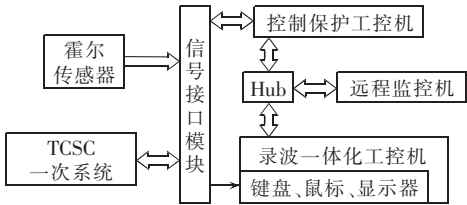


图 2 TCSC 装置整体结构图
Fig.2 Block diagram of TCSC equipment

流、电压信号的获取;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;控制保护工控机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;录波机主要功能是记录和显示 TCSC 本身及线路的运行状态;集线器(Hub)主要负责将整个实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;远程监控机为用户提供了良好的人机接口,用户可通过远程监控计算机获取 TCSC 装置本地运行状态及其参数,以及由远方向 TCSC 系统下发控制指令以实现对装置的远程监控。

2.2 TCSC 控制保护单元设计

主控机完成整个 TCSC 装置的控制和保护功能,是 TCSC 装置监控系统的核心,由工控机主板 ICP8601E、触发控制插件、数据采集插件、保护插件及保护开关量插件组成,通过工控机底板上 ISA 总线连接,采用共享存储区的方式进行数据交换,其原理框图如图 3 所示^[14-15]。

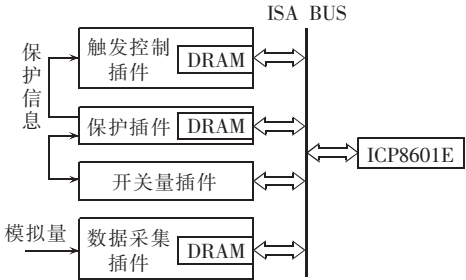


图 3 TCSC 主控机的原理框图
Fig.3 Principle diagram of control & protection unit

工控机主板 ICP8601E 是 TCSC 装置的主控器,主要完成 TCSC 的中上层控制,按照用户的要求将用户下达的指令通过合理的运算转化为触发角控制命令,然后通过 ISA 总线将触发角控制指令写入触发控制插件的双口 RAM 中,触发控制插件通过查询

的方式获得触发控制角指令之后,将触发角指令转化为相应的触发脉冲。

触发控制插件采用 DSP 芯片实现,主要完成 TCSC 装置的底层控制,通过特定的控制逻辑综合处理来自中上层控制的触发控制角指令和保护插件的保护动作指令,并产生装置所需的控制输出,如触发脉冲输出及其闭锁,旁路接触器开关操作控制信号等。

数据采集插件用于采集主控器所需的 TCSC 运行参数,为主控器提供控制算法所需的计算数据。数据采集插件上的 DSP 芯片每周采样 24 点,每半个周期进行一次 DFT 计算,并将计算结果保存到双口 RAM 的相应位置,通过中断的方式和工控机完成数据交换。为了方便 DFT 计算,AD 采样结果的存储采用双倍暂存区扩展法完成。

保护插件及开关量插件主要完成 TCSC 装置的过电压和过电流保护,保护插件和数据采集插件的硬件结构相同,保护开关量插件主要完成保护所需开关量的隔离和调理,通过带线与保护插件相连。保护插件采集 TCSC 装置的状态信息,根据保护算法产生保护动作信息并直接送到触发控制插件上,进而产生保护动作,同时中断工控机,通过双口 RAM 将相应的保护信息传送给工控机 CPU。

除主控机的主程序外,其余软件采用汇编语言,主控机的主程序采用 C 语言编程,为用户提供了用 C 语言编写的主控机用户界面,用户可以通过主控界面下达相应的同步信号切换和各种触发命令,完成远程监控机的通信和数据交换,并提供实时状态信息显示,可以直接计算实时基频阻抗值和方便地进行基频阻抗特性曲线的绘制。控制算法的程序接口完善,用户可以方便地进行各种控制策略的研究。

2.3 TCSC 录波单元设计

TCSC 的录波单元主要完成实时波形显示、录取和上传录波数据等功能。主要由一体化工控机和 2 块录波插件及 1 块开关量插件通过工控机的 ISA 总线组成,同样采用共享存储区的方式进行数据交换。其原理框图如图 4 所示。

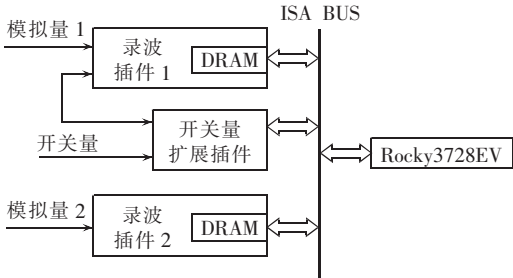


图 4 TCSC 录波机原理框图
Fig.4 Principle diagram of recording unit

录波插件和数据采集插件的硬件结构相同,每块录波插件可以录取 16 路模拟量,开关量扩展插件可以录取 24 路开关量,模拟量每周采样 12 点,开关量每周采样 96 点,将采集结果直接存储到相应的双口 RAM 中,每采样 1 周期就通过中断的方式将采样数据传送给录波机,录波机利用这些数据进行

实时波形显示,转换成用户和远程监控机所需的数据格式进行录波。

录波插件采用汇编语言编程,录波机的主程序也采用 C 语言编程,为用户提供了 C 语言编写的录波用户界面,实时显示 3 个通道的 5 个周期模拟量或开关量。用户可以通过录波界面,任意选择需要实时显示的通道和需要录取的波形周期长度,同时提供了通过网络与远程监视机进行通信的接口,方便用户进行远程监视和控制。

2.4 TCSC 远程监控上位机设计

图 5 为 TCSC 远程监控上位机操作主界面,采用 VC++6.0 软件开发而成。画面左上方是单相 TCSC 主接线图,右侧表格用于显示系统的运行状态,左下方框图用于选择控制功能及设置系统参数、选择控制模式和同步触发方式等。通过主界面上部的工具栏还可以执行装置投入和退出的顺序控制操作、保护定值修改、录波设置与显示等基本功能。通过这个操作主界面,可以控制 TCSC 的各种运行情况,获取 TCSC 装置的各项基本运行信息,还能实时显示所需的波形。

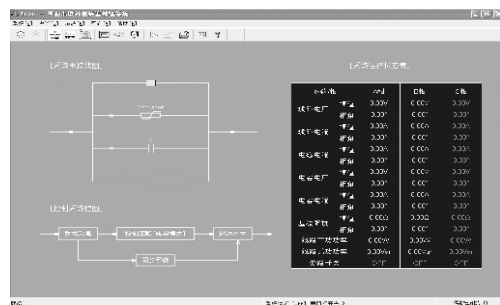


图 5 TCSC 远程监控机操作主界面

Fig.5 Operating interface of remote monitoring unit

3 动态模拟实验结果及分析

利用所研制的 TCSC 装置分别在电容电压和线路电流 2 种同步方式下进行了基频阻抗阶跃特性试验。试验的基本条件为:采用交流 220 V 市电通过变压器将电压降为 60 V 接入装置;如没有特殊说明,中层控制模式为开环运行。

图 6、7 所示为实验结果。 i 、 u_c 、 i_L 、 Z 分别为 A 相的线路电流、电容电压、电感支路电流和 TCSC 基频阻抗。限于篇幅,仅给出部分实验波形。

3.1 容抗的阶跃响应

在电容电压同步下,晶闸管的触发角从 180° 跃变到 152° ,动模试验波形如图 6(a)所示。在线路电流同步下,触发角从 90° 跃变到 58° ,动模试验波形如图 6(b)所示。由实现波形可知,当 TCSC 在电容电压同步方式下,基频阻抗阶跃响应曲线会产生超调和过冲现象,而在线路电流同步下,基频阻抗阶跃响应曲线不会产生超调和过冲现象,变化过程比较平缓,这一实验结果和文献[5]中的仿真结果一致。

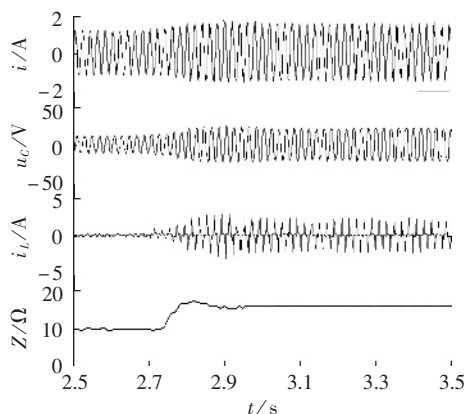
3.2 工作区域间阻抗阶跃响应

在电容电压同步下,分别进行以下 2 组试验,即

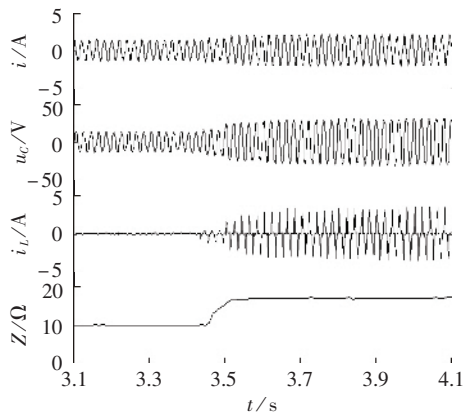
TCSC 从 Bypass 状态直接跃变到触发角为 152° ,从 Bypass 经过 100 ms 的 Block 状态后再跃变到 152° 试验波形分别如图 7(a)(b)所示。

由实验波形可以看出,在电容电压同步方式下,若 TCSC 直接从感性区的 Bypass 状态跃变到感性区的 152° 触发角,将会产生严重的过电流和过电压现象,TCSC 的基频阻抗也会出现很大的超调。可见采用文献[11]中提出的 3 步法,基本上可以消除过电流、过电压以及阻抗超调的问题。

在线路电流同步方式下,进行工作区域间阻抗阶跃响应实验,结果表明在这种情况下,TCSC 装置不会产生过电压现象,所以在线路电流同步方式下



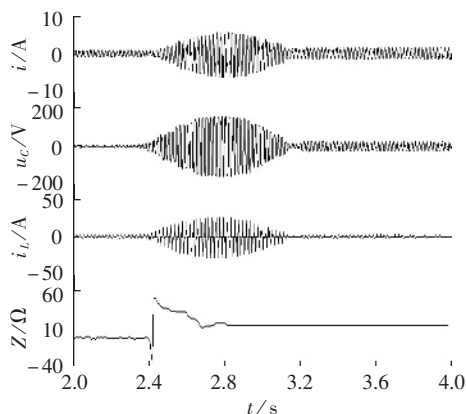
(a) 电容电压同步下触发角从 180° 跃变到 152°



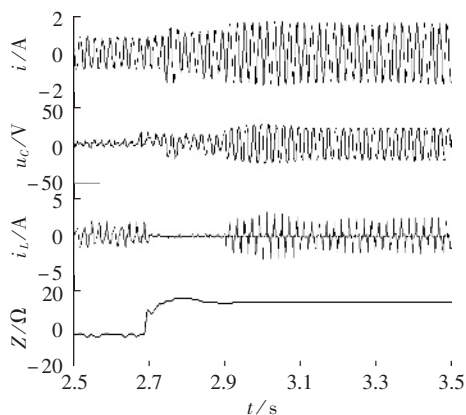
(b) 线路电流同步下触发角从 90° 跃变到 58°

图 6 容抗的阶跃响应

Fig.6 Capacitive step response



(a) 从 Bypass 直接跃变到 152° 触发角



(b) Bypass 经过 Block 再跃变到 152° 触发角

图 7 电容电压同步下区域间
阻抗阶跃响应Fig.7 Impedance step response to capacitive
voltage synchronization signal

可以直接进行工作区域间的阻抗阶跃变化控制。

通过以上实验波形可以看出,线路电流同步方式优于电容电压同步方式,和文献[12]的结论相符,同时,为了取得更好的阶跃响应特性,可以在底层阻抗控制中采用适当的补偿控制环节^[5],其他相关实验结果也证明了这一点。

4 结论

a. 所设计的 TCSC 控制保护系统采用硬件模块化设计,采用分层控制的方法实现装置的控制,控制算法易于实现,同时具有完善的录波和远程监控功能,可以很方便地利用所研制的装置进行 TCSC 的相关实验研究。

b. 动模实验表明,在线路电流同步触发方式下,TCSC 的基频阻抗阶跃特性较好,不会像电容电压同步方式那样,产生电流、电压的超调和阻抗调节中的过冲现象,且可以直接进行运行区域间的阶跃变化。

c. TCSC 动态模拟实验装置的成功研制,为进一步有关 TCSC 在电力系统中动态行为的研究提供了较为理想的实验平台,可为工程实际提供有参考价值的结果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] DOLAN P S, SMITH J R, MITTELSTADT W A. A study of TCSC optimal control parameters for different operating conditions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 1972 - 1978.
- [3] del ROSSO A D, CANIZARES C A, DONA V M. A study of TCSC controller design for power system stability improvement [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1487 - 1496.
- [4] MATSUKI J, IKEDA K. Loop current characteristics of thyristor controlled series capacitor[J]. Electrical Engineering in Japan, 1998, 125(1): 37 - 46.
- [5] 张慧媛,姜建国,冯宇. 可控串补装置的动态建模及数字仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 14 - 18.
- [6] ZHANG Hui - yuan, JIANG Jian - guo, FENG Yu. Research on dynamic modeling and digital simulation of TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 14 - 18.
- [7] 王宝华,杨成梧,张强. TCSC 自适应逆推控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(4): 59 - 61.
- [8] WANG Bao - hua, YANG Cheng - wu, ZHANG Qiang. Design of adaptive backstepping controller of TCSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(4): 59 - 61.
- [9] 葛俊,童陆园,耿俊成,等. TCSC 暂态过程中晶闸管导通角特性的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(7): 18 - 22.
- [10] GE Jun, TONG Lu - yuan, GENG Jun - cheng, et al. Research on thyristor conduction angle characteristics in transient process of TCSC[J]. Power System Technology, 2001, 25(7): 18 - 22.
- [11] 林宇峰,徐政,黄莹. TCSC 功率振荡阻尼控制器的设计[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 35 - 39.
- [12] LIN Yu - feng, XU Zheng, HUANG Ying. Design of TCSC auxiliary controller for inter - area power oscillation damping[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 35 - 39.
- [13] 尹建华,江道灼. 可控串补的非线性控制对电力系统稳定性的影响研究[J]. 电工技术学报, 1999, 14(3): 70 - 75.
- [14] YIN Jian - hua, JIANG Dao - zhao. TCSC nonlinear control influence on power system stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(3): 70 - 75.
- [15] 曹路,李海峰,陈珩,等. 用于 TCSC 阻抗控制的变参数 PID 方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 7 - 11.
- [16] CAO Lu, LI Hai - feng, CHEN Heng, et al. Variable parameter PID control method for TCSC impedance control[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(24): 7 - 11.
- [17] 尹忠东,童陆园,郭春林,等. 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.
- [18] YIN Zhong - dong, TONG Lu - yuan, GUO Chun - lin, et al. Research on characteristics of TCSC device based on transient stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 19 - 25.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 朱庆春,丁洪发,张明龙,等. 与 RTDS 互联的 TCSC 控制的物理模拟装置研制[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 50 - 55.
- [22] ZHU Qing - chun, DING Hong - fa, ZHANG Ming - long, et al. Development of TCSC physical simulative equipment connected with RTDS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 50 - 55.
- [23] 徐政. 可控串补的可控范围及串容与电抗关系的研究[J]. 电工技术学报, 1998, 13(3): 13 - 17.
- [24] XU Zheng. The controllable impedance range of TCSC and the parameter selection method of its TCR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(3): 13 - 17.
- [25] 汪小澄,宋香丽. 一种基于 DSP 的高速数据采集系统[J]. 仪表仪器与传感器, 2004(6): 37 - 38.
- [26] WANG Xiao - cheng, SONG Xiang - li. High - speed data acquisition system based on DSP[J]. Instrument Technique and Sensor, 2004(6): 37 - 38.

作者简介:

姚 伟(1983-),男,湖北浠水人,博士研究生,研究方向为 TCSC 实验装置的研制和调试(E-mail:yao_wei@163.com);

杨 毅(1983-),男,江苏东台人,硕士研究生,研究方向为 TCSC 实验装置的研制和调试;

孙海顺(1971-),男,湖北鄂州人,讲师,博士,主要研究方向为电力系统分析;

文劲宇(1970-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统控制、人工智能 FACTS 技术在电力系统中的应用;

程时杰(1945-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,IEEE 高级会员,主要从事电力系统的稳定分析与控制、超导和 FACTS 技术在电力系统中的应用、人工智能及其在电力系统中的应用、电力线载波通信等方面的研究。

Design and implementation of TCSC dynamic simulation system

YAO Wei,YANG Yi,SUN Hai-shun,WEN Jin-yu,CHENG Shi-jie

(Electric Power Security and High Efficiency Lab,Huazhong University
of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: A design of TCSC(Thyristor Controlled Series Compensation) dynamic simulation equipment is presented,which includes the control & protection unit,recording unit and remote monitoring unit. Each function module of unit performs a unitary task and exchanges data with each other via dual-port RAM. All function modules are integrated together via ISA bus. With the designed hardware structure,the real time performance,reliability and extendibility of equipment are greatly improved. The remote monitoring unit communicates with the control & protection unit and recording unit through Hub for remote monitoring,while the control & protection unit and recording unit have their own interface for local control & monitoring and commissioning. Hierarchical structure is applied and the control strategies of middle and top levels are programmed with C for convenient study of various control strategies. With the developed equipment,the base frequency impedance characteristics of TCSC are analyzed with the line current and capacitance voltage as its synchronization signal respectively. The experimental results show that,the impedance can be rapidly adjusted and different impedance modes flexibly switched.

Key words: thyristor controlled series compensation; dynamic simulation; dynamic experiment; impedance step response