

与 RTDS 互联的 TCSC 物理模拟装置研制

朱庆春¹, 丁洪发¹, 张明龙², 张 健², 张榕林²

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 福建省电力试验研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 介绍了一种与实时数字仿真器 RTDS(Real Time Digital Simulator)互联的可控串联电容补偿器 TCSC(Thyristor-Controlled Series Capacitor)物理模拟装置, 针对 RTDS 的实际情况设计了系统接口, 使得两者可以结合形成闭环的混合仿真系统。该装置具有人机界面友好、便于监控的特点, 而且其控制电路和程序设计模块化, 易于进行功能扩展。在装置研制的基础上, 进行了基本运行方式以及阶跃响应试验, 所得结果与理论分析基本一致。装置的成功研制, 为更深入研究 TCSC 及其控制器的动态特性和控制策略提供了良好的实验平台。

关键词: 实时数字仿真器; 数字-模拟混合仿真; 可控串联电容补偿器; 动态模拟实验

中图分类号: TM 734; TM 76

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)02-0050-05

0 引言

实时数字仿真器 RTDS(Real Time Digital Simulator)采用并行处理技术和专门设计的硬件保证运行的实时性, 能够满足交流系统各暂态现象研究的要求, 也可以与外部物理设备构成闭环测试系统。利用 RTDS 这个特点, 可以研究装置的运行特性及其和系统的相互作用, 为实际装置的工程设计、设备选购和实现奠定理论和实验基础; 也可以比较各种装置及其控制器的数学模型与实际设备的差别, 有助于人们建立更为详细精确的设备数学模型。目前, RTDS 已经在继电保护装置等领域的研究中发挥了重要作用^[1,2]。

可控串联电容补偿器 TCSC(Thyristor-Controlled Series Capacitor)是一种重要的柔性交流输电系统 FACTS(Flexible AC Transmission System)的应用装置。国内外对此已有许多研究, 并有部分投入使用^[3~7]。

本文以数-模混合仿真方式研制了一套包括主电路(三相)、控制电路在内的 TCSC 整体物理模拟装置, 并针对 RTDS 的实际情况设计了系统接口, 使得两者可以形成闭环的混合仿真系统。限于篇幅, 本文主要介绍互联接口设计、装置的研制和一些基本实验, 模拟装置与 RTDS 互联的实现及其实验将在后续文章中加以介绍。

1 TCSC 模拟装置与 RTDS 的互联方式

针对数模混合仿真的要求和 RTDS 的实际情况, 笔者为模拟装置与 RTDS 的互联设计了三种方案, 以下分别进行介绍。

1.1 模拟装置与 RTDS 互联方案一

互联方案一的原理框图如图 1 所示, 通过以下设计实现: 在 RTDS 里建立除 TCSC 控制器外的仿真系统; 由 RTDS 计算出有关电压、电流, 将这些信号通过 D/A 转换传递给模拟装置控制器, 同时将各个开关断路器的状态通过开出口传递给控制器; 控制器接收这些信号并运算, 将运算结果中对断路器的控制信号通过开出口传递给 RTDS, 同时将触发脉冲通过开关量输入口传递给 RTDS, 用于驱动 RTDS 的晶闸管模块。

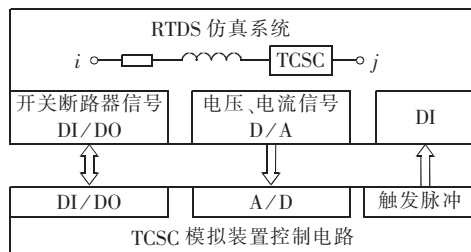


图 1 模拟装置与 RTDS 互联方案一

Fig.1 The dynamic simulative equipment interconnects with RTDS—scheme 1

互联方案一可以满足验证 TCSC 各种控制策略的要求, 如抑制线路功率低频振荡、控制线路潮流及提高系统暂态稳定等; 还可以为实际 TCSC 装置控制器的设计和实现提供参考和指导。

1.2 模拟装置与 RTDS 互联方案二

互联方案二的原理框图如图 2 所示, 通过以下设计实现: 在 RTDS 里建立包括 TCSC 及其控制器在内的完整仿真系统, 可以单独地进行仿真计算, 即 TCSC 模块由 RTDS 内部的 TCSC 控制器进行控制; 同时, RTDS 计算出的实时节点电压通过功率放大器驱动模拟装置主电路; 模拟装置控制器采集主电

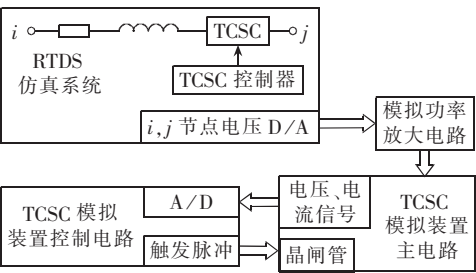


图 2 模拟装置与 RTDS 互联方案二

路电压、电流信号,并根据这些信号进行运算,计算得到的触发脉冲用于导通主电路的晶闸管模块。

互联方案二可用于比较 RTDS 内部 TCSC 及其控制器的数学模型与实际 TCSC 装置的差别,有助于人们建立更为详细精确的 TCSC 数学模型;还可以为实际 TCSC 装置的工程设计、设备选购及装置的实现提供参考和指导。

1.3 模拟装置与 RTDS 互联方案三

互联方案三的原理框图如图 3 所示,通过以下设计实现:在 RTDS 里建立不包含 TCSC 主电路及其控制器的仿真系统,用 TCSC 物理模拟装置代替 TCSC 仿真模块;将 RTDS 计算出的实时节点电压通过功率放大器驱动模拟装置主电路,同时将主电路的相应电压、电流信号回馈给 RTDS;模拟装置控制器采集主电路电压、电流信号,同时通过开入口从 RTDS 获得相关的开关断路器信号;控制器根据这些信号进行运算,将运算结果中对断路器的控制信号通过开出口传递给 RTDS,同时将触发脉冲用于导通主电路的晶闸管模块。

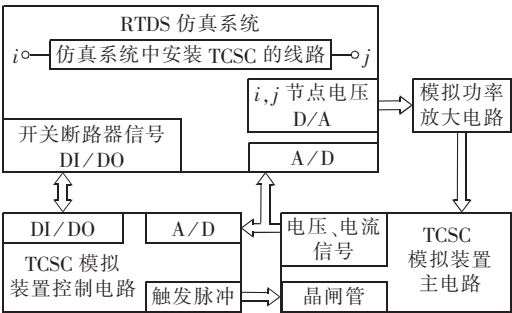


图 3 RTDS 模拟装置与 RTDS 互联方案三

传统动模实验是将电力系统的各个部分按照相似理论设计成物理模型,并组成一个电力系统模型来进行的。互联方案三在一定程度上可以代替传统动模,帮助人们对 TCSC 特别是其换流器的动态特性及其对系统的影响进行研究,也有助于对 TCSC 的控制策略进行研究,可以为 TCSC 控制器的设计和实现,以及实际 TCSC 装置的工程设计、设备选购及实现提供参考和指导。

2 主电路和保护电路

2.1 TCSC 模块运行参数

为了提高串补容量,工程中大多采用两个或多个 TCSC 模块串联的结构,为便于比较研究,本装置提供单模块 TCSC 和双模块 TCSC 两种运行方式,通过控制面板上的开关可以方便地切换运行方式。

TCSC 模块的电路结构如图 4 所示。

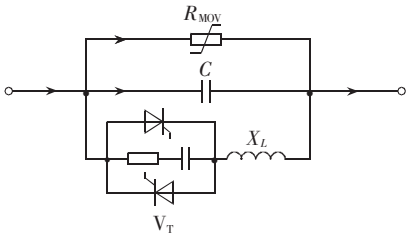


图 4 TCSC 模块电路结构图

Fig.4 The circuit configuration of TCSC module

双模块 TCSC 由两个相同的模块串联构成。

TCSC 模块主要参数中,正常运行电压为 200 V,线路长期运行电流为 20 A;晶闸管最大峰值电流为 100 A;模块允许容抗范围为 10~30 Ω;模块允许感抗范围为 2~6 Ω。

2.2 主电路元件参数

电容器型号为 BSMJ 0.45-20-1,单相干式电力电容器,额定电压 AC 450 V,额定容量 20 kvar,额定频率 50 Hz,额定电流 44 A,额定容抗 $X_C=10\ \Omega$ 。

电抗器参数的确定考虑了以下问题:为避免 TCSC 在旁路状态时出现工频及 2 次、3 次等高次谐波谐振,一般可取 LC 回路自振频率为 $f_0=(2.3\sim2.7)\text{p.u.}$,这里取 $f_0=2.45\text{p.u.}$ 。根据 $f_0=\sqrt{X_C/X_L}$ 计算可得电抗器参数为 $X_L=1.66\ \Omega$,即 $L=5.3\text{mH}$ 。电抗器品质因数 $Q=15$,额定电流 20 A。

晶闸管选用 Semikron 串联晶闸管模块 SKKT 106/16E,额定参数为 1600 V/180 A($t_h=35\text{ }^\circ\text{C}$,有效值)。

压敏电阻 R_{MOV} ,型号为 MY 31-1 620 V/10 kA。

2.3 模拟装置保护电路

模拟装置的保护电路主要由电容过电压保护、晶闸管过电压保护、过电流保护、主动过电压保护构成。

a. 电容过电压保护。本装置的实验电压是由电压功率放大器提供,且实验过程中各种运行工况是预先设定,使得电容器的过电压可能性较小。此外,电路中熔断器的串入,也可以进一步减小电容器的过电压可能性。所以,本模拟装置仅选用压敏电阻 R_{MOV} 作为电容器的过电压保护设备。

b. 晶闸管过电压保护。在晶闸管两端并联一个电阻电容吸收支路,参数为无感电阻 $R_s=150\ \Omega$,额定功率 25 W;无感电容 $C_s=0.15\ \mu\text{F}$,耐压 DC1200 V。

c. 模拟装置中晶闸管、电抗器、电容器的过电流保护利用熔断器实现。

d. 主动过电压保护。TCSC 可在故障后迅速进入旁路模式,将串补容抗在一个工频周期内转变为感抗,使短路回路等效阻抗加大,从而显著限制短路电流;同时降低装置过电压,大大降低了保护串补电容器的压敏电阻 R_{MOV} 的能耗,减轻其工作负担。

3 监控系统

3.1 监控系统硬件

TCSC 物理模拟装置监控系统硬件框图如图 5 所示,监控系统主要由三部分组成:以 APCI 5095 为核心构成的上位机部分;以 APCI 5467 为核心构成的下位机部分;以及以 APCI 5388 为核心构成的晶闸管脉冲产生和触发电路。

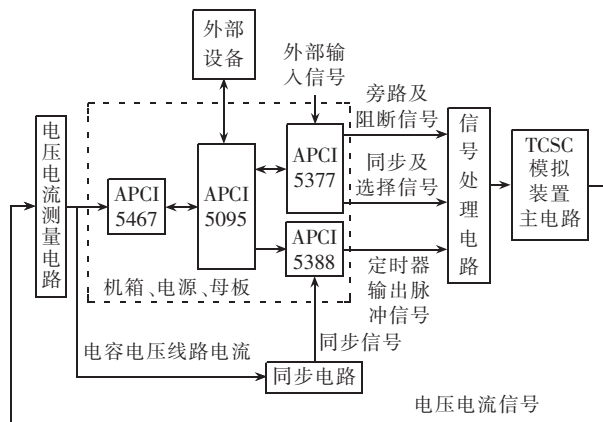


图 5 TCSC 模拟装置监控系统硬件框图

Fig.5 The hardware block diagram of TCSC monitoring system

APCI 5095 是一种处理器主板,它附带显示器、鼠标、键盘等终端,构成监控系统上位机,其主要功能如下:

- 从下位机获得当前运行状态信息并向用户显示,接受用户命令并执行;
- 完成外层阻抗控制计算;
- 读/写高精度计数器板 APCI 5388 和开入开出板 APCI 5377。

APCI 5467 是一种智能数据采集板,该板卡以 TMSVC 33 DSP 处理器为核心,具备高速高精度采集 34 路模拟量的能力,以该板卡为核心构成下位机,其主要功能如下:

- 采集各电压、电流并提交上位机;
- 完成中层阻抗闭环控制计算并将结果提交上位机;
- 完成其他运算任务。

这种上、下位机结构使得两者分别关注于不同的工作,为程序设计的模块化提供了硬件基础,针对不同的研究目的,用户只需修改程序而不必改动硬件电路就可以实现。

脉冲产生和触发电路。数字仿真结果表明,晶闸管触发脉冲是否精确可靠,对 TCSC 自身的响应能

力和稳定性有很大影响,特别影响到 TCSC 在容抗与感抗相互转化过程的转化速度及稳定性、消除次同步谐振的能力、以及过电压保护控制的特性等。模拟装置的这部分电路主要由同步信号发生电路、高精度定时计数器板 APCI 5388、脉冲展宽电路、高频脉冲发生电路、逻辑电路、隔离和功率放大电路等组成,其框图如图 6 所示。

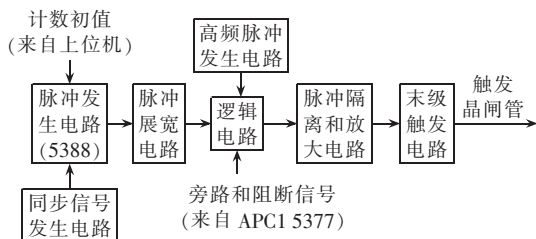


图 6 脉冲产生和触发电路框图

Fig.6 The block diagram of pulse generation and triggering

同步信号发生电路,包括同步信号整形电路、信号选择电路等几个部分。整形电路将同步输入信号根据过零点(采用专用比较器 LM 311 进行精确的过零检测)转换成方波信号输出;TCSC 的同步信号有两个来源,分别是电容电压和线路电流,其选择信号由用户在上位机监控界面上输入,由上位机将命令写入 APCI 5377,由 5377 开出口输出到信号选择电路的选择端,完成同步信号选择。

高精度定时计数器板 APCI 5388。上位机根据用户命令或下位机的中层阻抗闭环控制计算结果通过查表获得相应的触发延迟角,将该延迟角根据 APCI 5388 定时器的计数周期转换为定时器的计数初值,并写入 APCI 5388 板上的 82C 54 计数器芯片;5388 由同步信号触发计数,每周期发出正、负脉冲(窄脉冲)各一次分别用于触发正、反向晶闸管。

脉冲展宽电路,将计数器发出的窄脉冲展宽为 $100\mu s$,以有效触发 RTDS 内部的晶闸管模块。

高频脉冲发生电路,采用多谐振荡芯片 555 产生高频旁路脉冲,交给逻辑电路根据系统状态和用户命令情况进行选择,用于晶闸管全导通触发。

逻辑电路,根据用户命令或系统运行状态,判定 TCSC 当前应当按触发角导通、旁路还是应当闭锁。以硬旁路和硬阻断为例,为避免 TCSC 在容性工作区和感性工作区切换时产生的高谐振电压和峰值电流,需要在切换过程中设置一段时间(通常是半个周期即 $10ms$)的硬旁路或硬阻断。

当 TCSC 从容性切换到感性运行时,上位机向 APCI 5377 写值,由其开出口发出硬旁路命令,此时触发脉冲选择电路将选择高频旁路脉冲作为输出,完成硬旁路。

当 TCSC 从容性切换到感性运行时,上位机向 APCI 5377 写值,由其开出口发出硬阻断命令,触发脉冲将被闭锁,完成硬阻断。可见,逻辑电路的功能为:触发导通时,逻辑电路输出即为脉冲展宽电路的

输出;旁路时,逻辑电路输出为高频脉冲触发电路的输出,晶闸管全导通;阻断时,逻辑电路输出为 0(低电平),晶闸管关断。

逻辑电路的输出脉冲经隔离和功率放大,输入到脉冲变压器(末级触发电路的主要元件)原边;最后由脉冲变压器副边输出脉冲,触发晶闸管。

3.2 监控系统软件

监控系统软件基本框图如图 7 所示,其功能为:根据用户命令,控制 TCSC 装置的等效基波阻抗;实时显示系统电压、电流波形;根据用户输入的用户命令序列,连续地改变装置的等效基波阻抗,同时对变化过程进行录波,保存为 IEEE COMTRADE 的格式文件。

阻抗外层控制,即将用户命令转化为等效基波阻抗这一过程,可以应用各种策略,由于程序设计的模块化,只需根据接口规定对感兴趣的控制策略编程,即可嵌入系统运行,从而大大方便了研究工作。

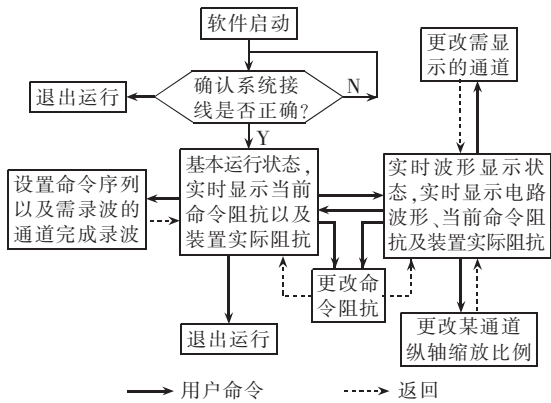


图 7 TCSC 模拟装置监控系统软件基本框图

Fig.7 The software block diagram of TCSC monitoring system

4 动模实验

利用研制的 TCSC 装置进行基本运行方式和阶跃响应实验,即容性区阶跃响应、感性区阶跃响应、由容性工作区切换到感性工作区以及由感性工作区切换到容性工作区。触发角 α 是以电容电压过零点为基准确定的,根据装置参数和谐振角计算公式^[8],可以计算出触发谐振角度为 $\alpha_{res}=143.27^\circ$,实验中的触发角将以此为参考进行设置。

实验的基本设置为:采用交流 220 V 市电经调压器降压为 120 V(有效值)接入装置;采用 TCSC 单模块运行方式;中层阻抗控制模式为开环。

4.1 容抗微调阶跃响应

TCSC 工作于容性区,触发角由 150° 阶跃至 165° ,实验结果如图 8 所示。图中, U_{TCSC} 为 TCSC 装置电压(即电容电压); I_{line} 为线路电流; I_L 为 TCSC 并联电抗电流; X_{TCSC} 为 TCSC 装置等效基波电抗(下同)。

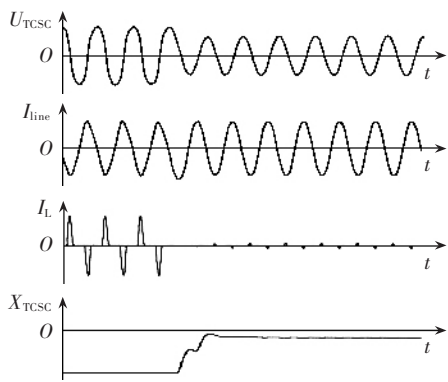


图 8 容抗微调阶跃响应

Fig.8 Capacitive step response

4.2 感抗微调阶跃响应

TCSC 工作于感性区,触发角由 110° 阶跃至 125° ,实验结果如图 9 所示。

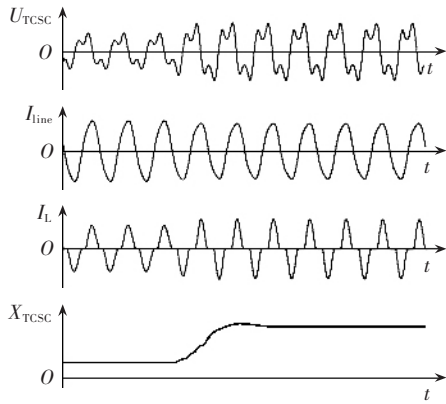


图 9 感抗微调阶跃响应

Fig.9 Inductive step response

4.3 由容性工作区切换到感性工作区

TCSC 工作于容性区,其后切换到感性区,触发角由 155° 阶跃至 125° ,在切换过程中,晶闸管被硬旁路半周期,即 10 ms,实验结果如图 10 所示。

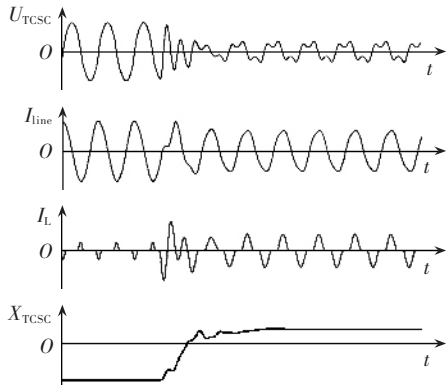


图 10 由容性工作区切换到感性工作区

Fig.10 Switch from capacitive region to inductive region

4.4 由感性工作区切换到容性工作区

TCSC 工作于感性区,其后切换到容性区,触发角由 125° 阶跃至 155° ,在切换过程中,晶闸管被硬阻断半周期,即 10 ms,实验结果如图 11 所示。

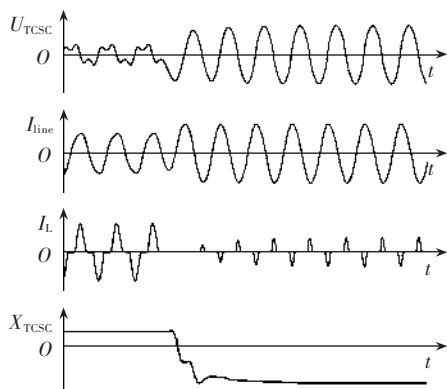


图 11 由感性工作区切换到容性工作区

Fig.11 Switch from inductive region to capacitive region

观察实验波形,在容抗微调 and 感抗微调实验中,触发角发生阶跃后一个周期内 TCSC 就恢复稳定;在容、感性工作区切换实验中,由于硬旁路和硬阻断策略的实施,迅速而稳定地完成了切换过程,TCSC 比较快地进入了稳态。如果中层阻抗控制采用闭环模式,如 PID 控制、变参数 PID 控制等,则 TCSC 的动态响应特性会更好^[9]。本装置将为各种控制策略的研究提供一个良好的实验平台。

5 结论

a. 针对 TCSC 模拟装置与 RTDS 仿真系统的三种类型的互联设计了系统接口,可以与 RTDS 形成闭环,为研究 TCSC 及其控制器的动态特性、TCSC 与系统的相互作用和各种 TCSC 控制策略提供了很好的实验平台。

b. 所设计的控制电路结构简单,程序设计模块化,可以方便地进行功能扩展,监控系统具有良好的人机界面,便于用户使用。

c. 动模实验表明,脉冲产生和触发电路能产生高精度的触发脉冲,并保证晶闸管可靠触发,研制的装置能可靠运行;工作区切换时,硬旁路和硬阻断策略保证了迅速而稳定的切换过程;模拟装置的成功研制,为实际 TCSC 装置的设计和实现提供了参考。

参考文献:

- [1] 李保福,李 营,王芝铭,等. RTDS 应用于线路保护装置的动模试验[J]. 电力系统自动化,2000,24(15):69-70.
LI Bao-fu,LI Ying,WANG Zhi-ming,et al. Comprehensive test of protective relays on different ends of long transmission line by RTDS[J]. *Automation of Electric Power Systems*,2000,24(15):69-70.
- [2] 吴 涛,李华伟. 应用 RTDS 建立安全自动装置模拟试验系统[J]. 华北电力技术,2002,(8):4-6.
WU Tao,LI Hua-wei. Making analog test system for automation safety device using RTDS[J]. *North China Electric Power*,2002,(8):4-6.

- [3] HINGORANI N G,GYUGYI L. Understanding FACTS — Concepts and technology of flexible AC transmission systems[M]. New York:IEEE Press,2000.
- [4] GAMA C. Brazilian north-south interconnection control-application and operating experience with a TCSC[A]. *Power Engineering Society Summer Meeting [C]*. [s.l.]: IEEE,1999. 1103-1108.
- [5] 樊 玥,向铁元,权白露. 串联补偿装置电气设计与实现[J]. 高电压技术,2003,29(5):55-57.
FAN Yue,XIANG Tie-yuan,QUAN Bai-lu. Design and realization of series compensation device[J]. *High Voltage Engineering*,2003,29(5):55-57.
- [6] 郑文斌,胡国文,王仲鸿. 伊敏-冯屯输电线路 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),1997,37(7):59-62.
ZHENG Wen-bin,HU Guo-wen,WANG Zhong-hong. Research on characteristics of TCSC dynamic simulation experiment apparatus on Yimin-Fengtun transmission line[J]. *Journal of Tsinghua University(Sci. & Tech.)*,1997,37(7):59-62.
- [7] 唐 勇,刘福斌,邓俊雄,等. 超高压输电系统可控串补(TCSC)动态模拟[J]. 电力系统自动化,1999,23(6):54-57.
TANG Yong,LIU Fu-bin,DENG Jun-xiong,et al. Dynamic simulation of thyristor controlled series compensator in UHV transmission system[J]. *Automation of Electric Power Systems*,1999,23(6):54-57.
- [8] 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):32-36.
XU Zheng. Steady state characteristics analysis of thyristor controlled series compensation[J]. *Power Electronics Technology*,1998,(2):32-36.
- [9] 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.
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.

(责任编辑:戴绪云)

作者简介:

朱庆春(1980-),男,湖南炎陵人,硕士研究生,主要从事电力电子技术在电力系统中的应用研究(E-mail:qc.zhu@263.net);

丁洪发(1973-),男,浙江江山人,博士,主要从事电能质量和 FACTS 技术研究;

张明龙(1976-),男,山东莱阳人,工程师,从事电力系统仿真分析工作(E-mail:zhangminglong@fjeptri.com.cn);

张 健(1974-),男,福建古田人,工程师,从事电力系统仿真分析工作;

张榕林(1965-),男,福建福州人,高级工程师,从事电力系统分析、安全稳定研究工作。

Development of TCSC physical simulative equipment connected with RTDS

ZHU Qing-chun¹, DING Hong-fa¹, ZHANG Ming-long²,
ZHANG Jian², ZHANG Rong-lin²

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Fujian Electric Power Test and Research Institute, Fuzhou 350007, China)

Abstract: TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor) physical simulative equipment that can be connected with RTDS (Real Time Digital Simulator) is introduced. The interface designed combines them to form a closed-loop hybrid simulation system. Its human-machine interface is friendly and easy to supervise the operation, and the control circuits and program are both modularized for easy extension of its functions. Based on the developed equipment, experiments are implemented to test TCSC basic operation modes and step response, which acquires similar results with that of academic analysis. The research work supports further studies of the dynamic characteristics and control strategy of TCSC and its controller with a well-founded experimental platform.

Key words: real time digital simulator; digital-analog hybrid simulation; thyristor-controlled series capacitor; dynamic simulative experiment