

用于 HVDC 控制保护系统闭环测试的 RTDS 建模

马玉龙¹, 肖湘宁¹, 陈琦², 钱珞江³, 陶瑜⁴, 曾南超⁴

(1. 华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电网有限公司调度局, 北京 100053; 3. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

4. 北京网联直流系统工程有限公司, 北京 100088)

摘要: 以西北—华中直流联网工程(灵宝工程)为例, 给出了基于实时数字仿真器 RTDS(Real Time Digital Simulator)的高压直流输电(HVDC)控制保护设备闭环测试方法、系统构成。针对 RTDS 中缺乏工程设计的滤波器, 采用等调谐锐度法建立了等效滤波器的模型。为使闭环系统有所参照及 RTDS 可脱离控制保护设备单独运行, 设计了一内部控制系统。所建模型已用于灵宝工程控制保护设备的实验室测试中, 设计规范、内部控制和外部装置控制间的结果对照表明所建系统模型正确。所使用方法及经验可推广到今后 HVDC 控制保护设备的测试中。

关键词: 高压直流输电; 建模; 实时数字仿真器; 测试

中图分类号: TM 72; TM 743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)02-0025-03

0 引言

近 20 年来, 我国高压直流输电事业得到了快速发展^[1-2]。直流控制保护系统是高压直流输电(HVDC)最关键的部分之一, 在现场安装调试之前需进行严格的系统测试, 以期全面检验控制保护参数配置的正确性和合理性, 同时还可发现硬件设备存在的缺陷。因此, 对控制保护设备的测试在整个直流工程的建设中具有重要意义, 而对电力系统的实时仿真则是整个测试环节中不可缺少的基本条件。随着计算机技术的发展, 数字仿真已越来越多地应用于电力系统仿真的各个领域^[3]。

本文以西北—华中背靠背直流联网工程(灵宝工程)^[4]为例, 在实时数字仿真器 RTDS(Real Time Digital Simulator)^[5-6]上实现了交直流系统的建模, 所建模型经检验正确并已应用于直流控制保护装置的实验室测试中。

1 HVDC 控制保护系统闭环测试系统

图 1 为实验室测试系统的示意图, 其中, 放大器

用于产生和现场一致的电压和电流; 控制信号转换/隔离接口传送断路器状态及开断指令并实现电气隔离; RTDS 用于仿真一次系统。

2 RTDS 建模

RTDS 上的建模要受 RTDS 硬件资源和配置的约束, 现有的 RTDS 的规模为 3 个 RACK, 每个 RACK 上有 8 块 3PC 卡。

2.1 建模原则

从闭环测试的本意讲, 一次系统建模应当真实地反映实际系统的情况, 然而原原本本地再现一次系统的原貌不仅不可能, 而且也无此必要, 因此本次建模在不影响闭环测试准确度和可信度的前提下做了若干简化, 这包括:

- a. 两端交流系统进行了等值处理;
- b. 对若干开关状态量信号进行了简化;
- c. 其他一些工程近似。

2.2 换流站一次系统构成

- a. 换流阀: 12 脉动桥, 单极。
 - b. 直流平波电抗器: 1 组(背靠背工程)。
 - c. 交流滤波器和电容器: 220 kV 侧 3 组 HP12/24 滤波器、2 组 HP3 滤波器、2 组并联电容器组, 单组容量 36 Mvar, 共 7 组; 330 kV 侧 3 组 HP12/24 滤波器、1 组 HP3 滤波器、3 组并联电容器组, 单组容量 36 Mvar, 共 7 组。
 - d. 交流电抗器: 220 kV 侧 1 组, 30 Mvar; 330 kV 侧 1 组, 45 Mvar。
 - e. 直流线路: 无(背靠背工程)。
- 一次系统如图 2 所示。

2.3 建模实现

为减少用户的工作量并减小系统的运算负担,

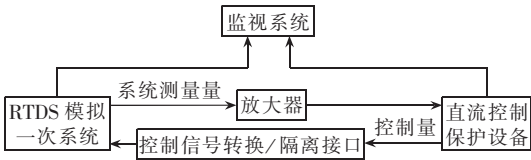


图 1 HVDC 控制保护设备的闭环测试系统图
Fig.1 Closed loop test system of HVDC control and protection devices

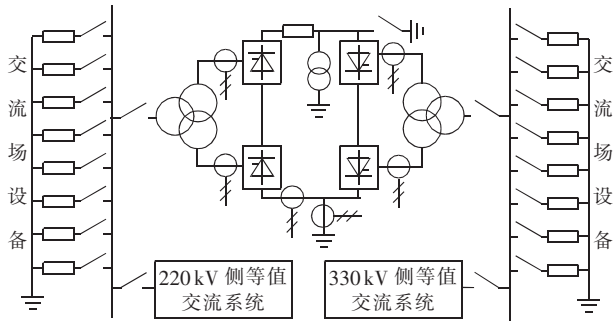


图 2 灵宝工程一次系统示意图

Fig.2 Primary system of Lingbao project

RTDS 配备了丰富的元件库,包括发电机组、阀组、滤波器组、开关等,借助这些通用模型可完成大部分的建模工作。但在建模过程也发现有些问题需特殊考虑,这包括 2 部分。

2.3.1 220 kV 侧的 HP12/24 滤波器的等值处理

对于 220 kV 侧的 HP12/24 滤波器,由于在 RTDS 中没有相应的模型,所以考虑将其等值成和其相似的双调谐模型,采用等调谐锐度($Q=X_L/R$)法,如图 3,4 所示(n 为谐波次数)。

由图 4 可以看出,等值模型和实际模型的调谐阻抗特性非常相似,由计算结果知 2 种模型都在 12 次和 24 次谐波下阻抗最小,可见 2 种模型的调谐特性一致,可用等值处理后的滤波器模型代替实际模型。

2.3.2 直流传输线

受现有 RTDS 规模的限制,本次仿真实验的模型不可能在 1 个 RACK 中完成,至少需要 2 个 RACK。为此将 220 kV 侧的无穷大电源、交流滤波器、换流

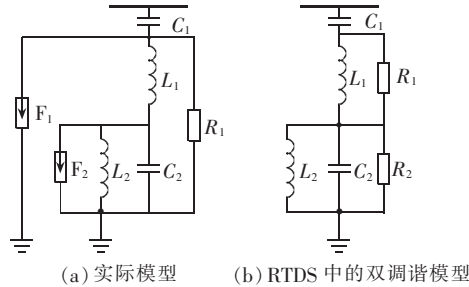


图 3 220 kV 侧 HP12/24 滤波器的实际模型和等值模型

Fig.3 Actual and equivalent models of 220 kV HP12/24 filter

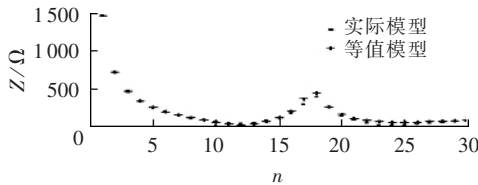


图 4 实际模型与等值模型的调谐特性对比

Fig.4 Tuning characteristic contrast between actual and equivalent models

变和 2 个阀组放入 RACK1 中进行仿真,330 kV 侧的各元件则放入 RACK2 中仿真。由于 RACK1 与 RACK2 之间在电气上必须有 1 条超过 30 km 长的线路进行连接,否则无法运行。为此在 220 kV 侧和 330 kV 侧的阀组之间增加 1 条长 31 km 的线路,传输线的模型采用 Bergeron 模型^[7],如图 5 所示。

由于直流传输线在实际工程中是不存在的,必须尽可能地消除它对系统运行的影响,因此在平波电抗的参数中扣除直流传输线的电感值。

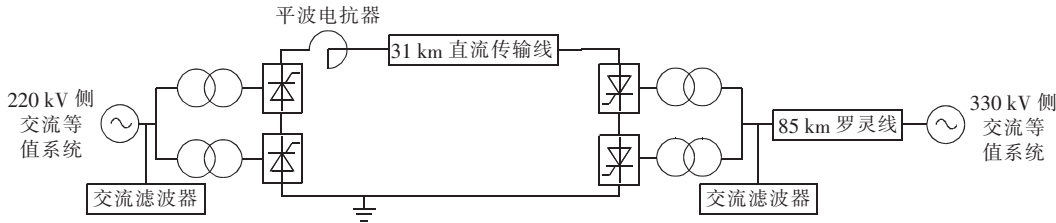


图 5 考虑了传输线后的 HVDC 系统模型

Fig.5 HVDC system model considering transmission lines

3 内部控制系统

为了完善并校验一次系统模型,并且在实际控制保护设备未进行测试前进行理论分析,以某工程的控制系统为参考,设计了 RTDS 内部控制系统,包括换流器的点火控制、分接头控制等。基本控制策略为整流侧定电流控制,逆变侧为定熄弧角控制,如图 6 所示。

4 模型校验与闭环测试

采用上述 RTDS 模型,在内部控制系统和外部控制(直流控制保护设备控制)下的稳态运行参数如表 1 所示(表中, U_{di0} , U_{di0}' 分别为换流器整流侧、逆变

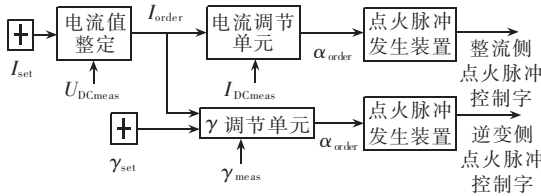


图 6 RTDS 内部控制系统

Fig.6 RTDS internal control system

侧无相控直流电压; μ , μ' 分别为整流侧、逆变侧换相角; a , a' 分为整流侧、逆变侧 Tap 位置)。

由表可见,RTDS 模型无论运行在内部控制还是外部控制,系统的额定稳态运行参数均能满足工程要求。RTDS 上几个典型波形如图 7~9 所示。

表 1 系统稳态运行参数

Tab.1 System parameters under stable condition					
运行方式	I_d/kA	U_d/kV	U_{d0}/kV	U_{d0}'/kV	$\alpha/(\circ)$
设计值	3	120.00	68.60	68.30	15.0
内部控制	3	121.88	70.17	68.64	15.1
外部控制	3	122.00	69.50	68.20	15.0

运行方式	$\mu/(\circ)$	$\gamma/(\circ)$	$\mu'/(\circ)$	a	a'
设计值	—	17.0	—	0	0.3
内部控制	22.03	17.0	22.95	0	0
外部控制	22.80	17.1	22.60	1	0

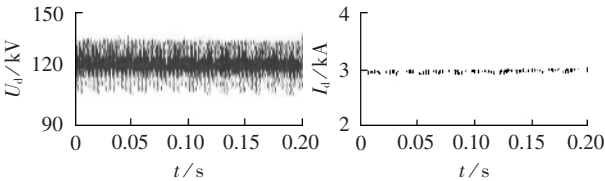


图 7 U_d 和 I_d
Fig.7 U_d and I_d

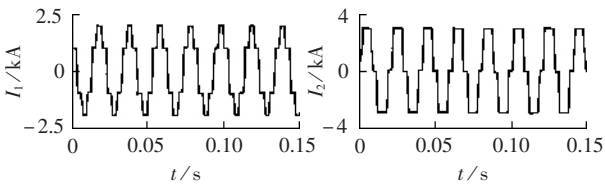


图 8 220 kV Y/D 和 Y/Y 换流变阀侧相电流
Fig.8 220 kV phase current of Y/D and Y/Y
converter transformer at valve side

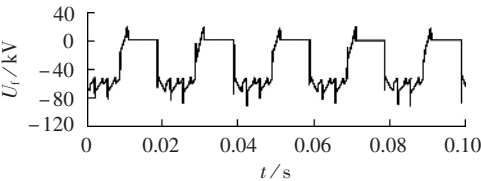


图 9 220 kV 侧阀电压
Fig.9 Valve voltage at 220 kV side

5 结语

本文结合灵宝工程直流控制保护设备的测试，在 RTDS 上实现一次系统建模。设计规范、内部控制

和外部控制的结果对照表明所建一次系统模型正确。另外,本文所建立的内部控制可使 RTDS 脱离外部控制运行,可用于系统特性及控制保护系统的研究。

参考文献:

[1] 王明新. 现代新技术在高压直流输电的应用[J]. 国际电力, 2003, 7(2): 20-24.
WANG Ming-xin. Newest modern techniques applied in HVDC system[J]. **International Electric Power**, 2003, 7(2): 20 - 24.

[2] 浙江大学直流输电电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.

[3] 陈礼义, 顾强. 电力系统数字仿真及其发展[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 1-6.
CHEN Li-yi, GU Qiang. Power system digital simulation and its development[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1999, 23(23): 1-6.

[4] 电网建设公司. 西北—华中联网背靠背直流工程功能规范书[R]. 北京: 国家电网公司电网建设分公司, 2002.

[5] DUCHEN H, LAGERKVIST M, KUFFEL R, et al. HVDC simulation and control testing using a real-time digital simulator (RTDS)[C]//**The First International Conference on Digital Power System Simulators**. Texas, USA: [s.n.], 1995: 213 - 218.

[6] KUFFEL R, GIESBRECHT J, MAGUIRE T, et al. RTDS—a fully digital power system simulator operating in real time[C]//**The First International Conference on Digital Power System Simulators**. Texas, USA: [s.n.], 1995: 300 - 305.

[7] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

马玉龙(1975-), 男, 宁夏青铜峡人, 博士研究生, 主要研究方向为高压直流输电(E-mail: ma_yulong@163.com);
肖湘宁(1953-), 男, 湖南醴陵人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力电子技术、现代电能质量、高压直流输电。

Modelling of HVDC in RTDS for closed loop system test

MA Yu-long¹, XIAO Xiang-ning¹, CHEN Qi²,
QIAN Luo-jiang³, TAO Yu⁴, ZENG Nan-chao⁴

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. North China Grid Company Ltd., Beijing 100053, China;
3. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Beijing HVDC
System Engineering Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: With Lingbao Project as an example, a test system for HVDC control and protection devices based on RTDS(Real Time Digital Simulator) is introduced. Special filter model, which is absent in RTDS model library, is designed according to equal-tune-sharpness. To make RTDS operating independent of control and protection devices, an internal control system is designed. Tests in lab show that the designed system is correct. The introduced method and experiences can be used to other closed loop system test of HVDC control and protection devices.

Key words: HVDC; modelling; RTDS; test