



特高压直流输电系统实时闭环仿真建模

高鹏¹, 胡铭¹, 蔡汉生², 田杰¹, 陈松林¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 中国南方电网公司技术研究中心, 广东 广州 510623)

摘要: 仿真研究是发展高压、超高压和特高压电网的必要手段。为深入研究特高压直流输电技术和特高压交直流混联系统的特性, 基于 RTDS 仿真器和南瑞继保研制的±800 kV 直流控制保护样机搭建了云广直流输电系统“孤岛”运行方式实时闭环仿真模型。为验证所建模型的有效性和可信性, 与非实时电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC 对单电气元件特性、云广直流输电系统稳态潮流和暂态特征进行了仿真校核和分析。校核结果显示, 2 种仿真工具模拟的电气元件特性、系统稳态潮流和暂态特征基本一致, 从而表明了搭建的实时闭环云广直流输电系统的可用性和可信性。由于考虑了 UHVDC 控制与保护设备的控制作用的实时参与, 所搭建的闭环云广直流仿真系统将更能反映实际交直流系统的动态特性, 更具实际工程参考价值。所述的闭环云广直流输电仿真系统已成功应用于云广特高压直流输电工程相关的多项关键科研项目, 从而为云广特高压直流输电工程的建设和运行提供了有力的技术支持。

关键词: 特高压直流; 实时数字仿真; 控制与保护; 建模

中图分类号: TM771

文献标志码: A

文章编号: 1004-9649(2010)01-0020-05

0 引言

随着中国电力需求的增长, 输电电网应具备更高的输电能力和输电效率, 以满足安全可靠、经济合理的大容量、远距离输电要求。研究表明, ±800 kV 电压等级直流输电可以加快推进我国电网技术升级, 提高远距离、大容量输电的效率和经济性, 节约输电走廊资源, 为我国后续西电东送项目输电规划奠定坚实的基础^[1-2]。

本文介绍了基于 RTDS 仿真器与南瑞继保公司自主研发设计的 UHVDC 控制及保护系统样机搭建的闭环控制仿真试验环境。为验证所搭建的闭环仿真系统的有效性和可靠性, 与 PSCAD/EMTDC 电磁暂态软件对电气元件模型、云广直流输电系统“孤岛”运行方式稳态潮流和暂态特征进行了仿真比较分析。仿真校核结果基本一致, 从而验证了所建闭环云广直流输电系统电磁暂态仿真模型的可信性。本文所述的闭环云广直流输电仿真系统已成功应用于完成云广特高压直流输电工程相关的多项关键科研项目, 为云广特高压直流输电系统的建设和运行提供了有力的技术支持和帮助。

1 仿真工具及建模

1.1 RTDS 仿真器简介

RTDS 是世界上优秀的实时数字仿真系统之一。RTDS 采用并行处理的硬件结构和高速 DSP 芯片, 利用数学上可分隔子系统的概念在各运算芯片或芯片组之间分担计算任务, 各子系统之间的联结使用传输线模型或变压器模型。RTDS 是计算机并行处理技术和数字仿真技术发展的产物, 是一套专门用来对电力系统电磁暂态过程进行全数字模拟的仿真装置。RTDS 仿真能够经 D/A 转换后通过高性能的电压、电流放大器实时地输出, 可用于进行自动控制 and 保护等设备的闭环试验, 完成系统分析研究, 设备研发及各种培训。

基于相似原理的物理动模仿真系统保留了实际系统的物理特征, 仿真结果受到广泛认可。但其模拟电机的参数变化范围有限, 难以满足具体不同机组的仿真需求, 且参数调整和匹配困难; 动模 PI 型线路品质因数较低, 长线路模拟可能会暂态特性失真; 与过电压研究息息相关的换流变饱和和特性等参数难以与实际匹配。因此, 动模在基于实际系统参数的系统研究分析中, 越来越被方便、快捷和灵活的数字仿

收稿日期: 2009-06-07; 修回日期: 2009-09-02

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAA02A17; 2006BAA02A18)

作者简介: 高鹏(1980—), 男, 江苏徐州人, 硕士, 工程师, 从事系统仿真分析、直流输电、电力系统稳定控制技术研究。

E-mail: gaopeng@nari-relays.com



真所取代。与 BPA、Simpow 和 PSS/E 等数字机电暂态程序相比,RTDS 仿真器提供的暂态仿真结果要深刻得多,能够详细地模拟出一些在机电暂态程序中没有的现象,且 RTDS 仿真得到的系统特性包含了一个很大的频率范围(直流达几千赫),在这个频率范围内,RTDS 仿真系统是精确分析电力系统现象的理想工具^[3]。因此,国内一些学者提出“未来柔性交流输电技术 FACTS 的各种电力电子装置的样机试验将首先考虑在实时仿真器上进行”^[4]。

1.2 特高压直流控制保护系统样机简介

本次闭环控制仿真所用的特高压直流控制保护系统样机采用南瑞继保公司研制的 ± 800 kV 直流控制保护样机,该样机经过 ± 800 kV 直流数字和物理仿真模型的验证,能够满足特高压直流控制和保护功能的要求。图 1 所示是该 UHVDC 控制保护系统的层次结构示意图。

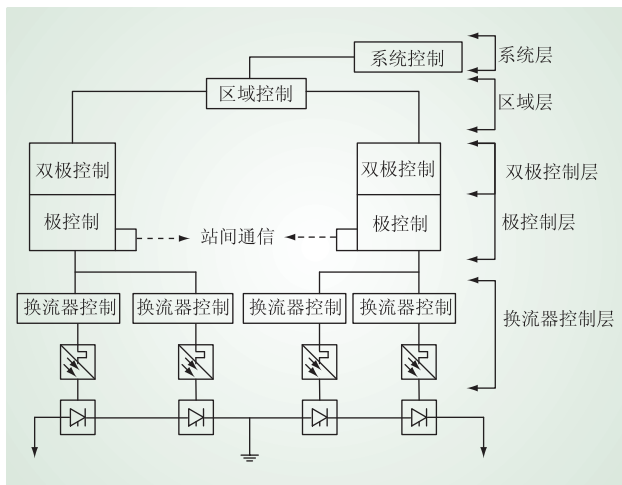


图 1 ± 800 kV 直流控制保护系统的总体层次结构

Fig.1 Hierarchy of ± 800 kV UHVDC control and protection system

1.3 特高压直流控制保护样机与 RTDS 的连接

分别用 1 个 RACK 模拟特高压直流输电系统的整流侧和逆变侧一次的电气系统,2 个 RACK 之间通过直流输电线路连接。直流控制保护系统采用实际 UHVDC 控制保护样机。RTDS 通过接口板卡与控制保护系统直接连接,形成闭环控制,具体连接如图 2 所示。另外,利用 2 个 RACK 分别模拟小湾电厂和金安桥电厂交流输电系统,并通过电厂交流出线与整流站 RACK 联系,直流受端系统采用考虑系统强度的电压源模拟,从而形成云广直流输电“孤岛”运行方式闭环仿真模型。

2 RTDS 与 EMTDC 仿真模型校核

RTDS 和 EMTDC 虽然都属于电磁暂态仿真,但

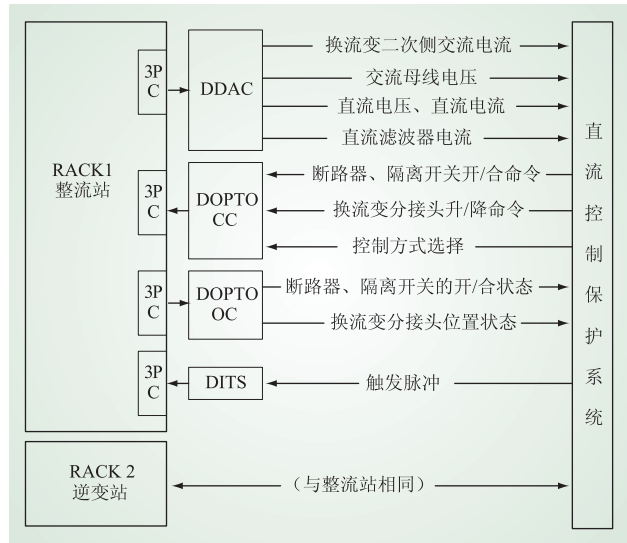


图 2 UHVDC 控制保护设备与 RTDS 的连接示意

Fig.2 Sketch diagram of the link of UHVDC control & protection system and the RTDS

是 RTDS 由于其实时仿真、快速计算的需要,其计算方法、元件特性模拟及实现等与 EMTDC 电磁暂态计算有一定区别。为保证 RTDS 仿真模型的可靠性,有必要利用 EMTDC 非实时迭代仿真工具校核模型。

2.1 发电机模型校核

发电机相关模型主要来源于设计单位。RTDS 和 EMTDC 都采用 7 阶水轮机模型。因不涉及电机内部故障仿真,EMTDC 发电机模型没有模拟电机饱和特性,其他参数基本一致。EMTDC 自定义与 RTDS 一致的励磁和调速模型。采用发电机经升压变带恒定负荷的 1 机 2 节点交流模型,通过模拟负荷有功突降,去校核发电机的动态特性。图 3、4 分别是 RTDS 和 EMTDC 模拟的系统频率及升压变高压侧电压仿真轨迹比较。RTDS 和 EMTDC 仿真轨迹及其变化趋势基本一致,说明所用的发电机模型动态

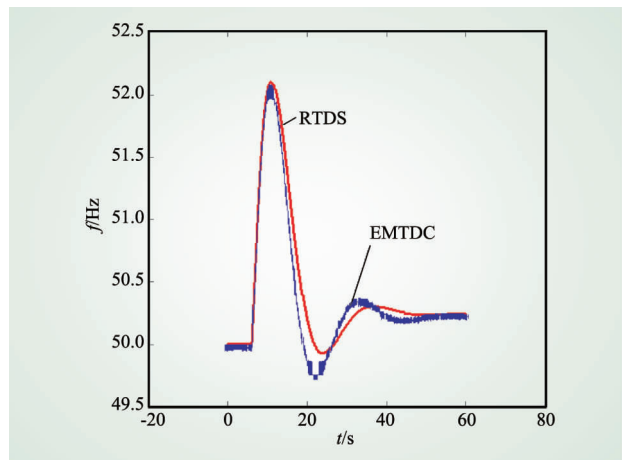


图 3 系统频率变化轨迹比较

Fig.3 Comparison of system frequency curves

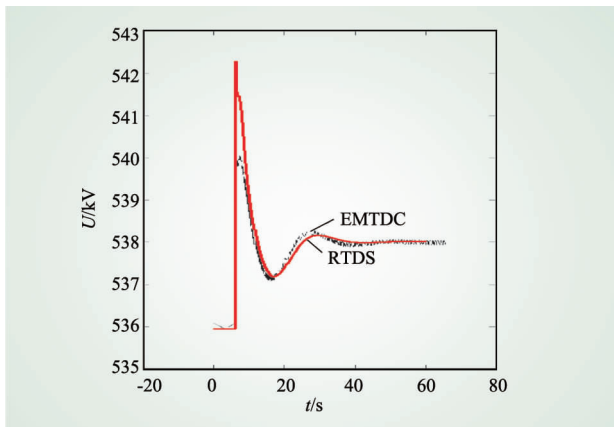


图 4 系统电压变化轨迹比较

Fig.4 Comparison of system voltage curves

特征一致, 暂态过程中的轨迹区别主要是 2 种仿真工具的负荷模型在暂态过程中表现出的特征有区别导致。

2.2 线路和滤波器模型校核

2.2.1 校核方法

通过对交直流线路和滤波器的阻抗和相位进行频率扫描并比较其轨迹, 从而实现模型的特性校核。目前, EMTDC 具有比较成熟、准确的频率自动扫描模块, 但 RTDS 没有相应的频率自动扫描功能。经研究, 可考虑利用频率可控的电压源连接被测电气元件, 通过线性变化频率或者基于 Script 语言编写自动扫描脚本文件去实现对元件频率特性的轨迹扫描。基于 MATLAB 将 RTDS 与 EMTDC 扫描的频率特性轨迹置于同一图中比较。图 5、6 分别是基于上述方法得到的楚雄换流站 DT11/24 型交流滤波器阻抗和相位频率特性轨迹比较。2 种仿真工具模拟的元件频率特性非常一致。

2.2.2 校核结论

利用 2.2.1 节所述方法, 对仿真系统中直流极线、两站接地极、电厂交流出线 and 整流、逆变 2 站的

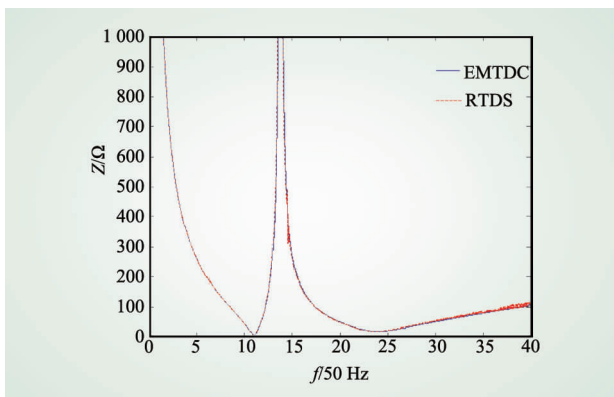


图 5 楚雄 DT11/24 型交流滤波器阻抗频率扫描轨迹比较

Fig.5 Comparison of impedance-frequency curves of AC filters (DT11/24) in Chuxiong station

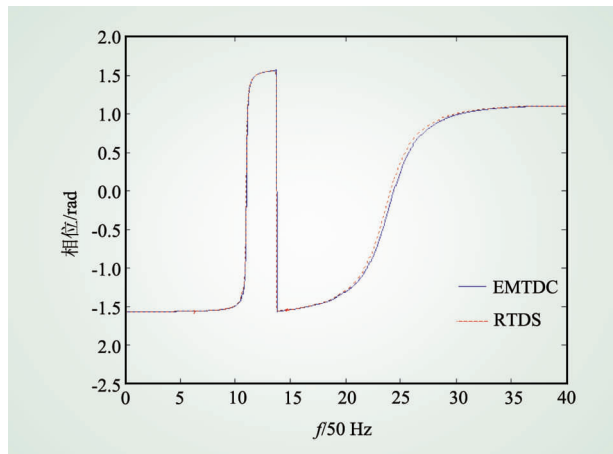


图 6 楚雄 DT11/24 型交流滤波器相位频率扫描轨迹比较

Fig.6 The comparison of phase-frequency curves of AC filters (DT11/24) in Chuxiong station

交、直流滤波器组等模型分别进行频率特性扫描和对比, 比较结果显示 RTDS 和 EMTDC 2 种电磁暂态仿真工具仿真的各电气元件频率特性基本一致, 从而校核了 RTDS 对交直流线路和滤波器等仿真模拟的可信性。

2.3 云广“孤岛”运行方式仿真校核

分别基于 EMTDC 和 RTDS 仿真工具, 对南方电网 ±800 kV 云广直流输电系统“孤岛”运行方式, 进行潮流计算和暂态稳定计算分析, 对基于 2 种工具的仿真计算结果进行比较和分析。

2.3.1 稳态潮流

云广“孤岛”运行方式, 直流定功率控制方式额定输送直流功率 5 GW。比较 RTDS 和 EMTDC 仿真的稳态潮流结果, 各交直流母线电压大小, 电厂发电机的有功和无功出力, 线路输送的有功等电气量基本一致。表 1、2 所示分别为机组出力和交流线路输送有功功率的仿真比较。

表 1 机组出力比较

Tab. 1 Comparison of outputs of generators

发电机组	有功功率/MW		无功功率/Mvar	
	RTDS	EMTDC	RTDS	EMTDC
小湾机组	687.7	690.5	186.8	188.6
金安桥机组	588.1	591.7	154.3	153.5

表 2 交流线路有功功率比较

Tab. 2 Comparison of active power of AC lines

交流线路	送端功率/MW		受端功率/MW	
	RTDS	EMTDC	RTDS	EMTDC
金安桥 I 线	1 182.1	1 179.7	1 158.7	1 157.8
金安桥 II 线	1 182.1	1 179.7	1 158.7	1 157.8
小湾 I 线	1 378.9	1 378.5	1 351.4	1 351.9
小湾 II 线	1 378.9	1 378.5	1 351.4	1 351.9



2.3.2 暂态特性

为了校核所搭建的基于 RTDS 和实际特高压直流控制保护样机的闭环电磁暂态仿真系统的动态特性可信性, 选取一个典型故障扰动进行系统暂态特性对比, 分析比较基于 EMTDC 和基于 RTDS 2 种工具的仿真结果, 以验证所建仿真模型的可靠性。

本次仿真验证选择的故障类型为云广直流额定运行, 小湾电厂单回出线送端三相接地永久性故障, 100 ms 后主保护动作切除该线路。

由图 8 所示的 EMTDC 和 RTDS 仿真的小湾 2 回出线有功和无功轨迹知, 小湾电厂 1 回出线首端发生三相永久性故障后, 主保护 100 ms 后切除该出线, 潮流转移到出线 2 上。图 9 所示是基于 EMTDC 和 RTDS 仿真的直流功率变化轨迹, 小湾出线送端发生故障后由于电压跌落, 直流功率也发生了大幅跌落。如图 8、9 所示, 基于 EMTDC 和 RTDS 仿真的暂态电气量变化轨迹基本一致。换流母线电压、交流系统频率等电气量比较轨迹。

由于基于 EMTDC 的仿真没有像 RTDS 闭环仿真真实、详细地考虑了直流控制保护系统的控制, 2 种仿真工具仿真的电气量轨迹细节还是略有差异, 这种差异主要是由于直流控制的不同导致。如闭环仿真考虑了整流侧暂态控制功能, 故障后有效防止了直流电流过大。如图 10 直流电流仿真轨迹比较,

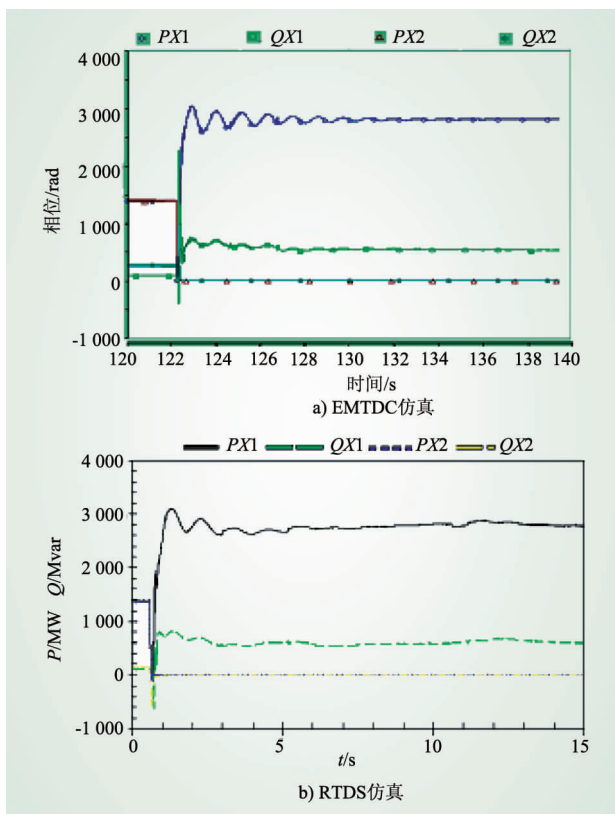


图 8 小湾双回线功率轨迹比较

Fig.8 Comparison of power flow curves of Xiao-Wan lines

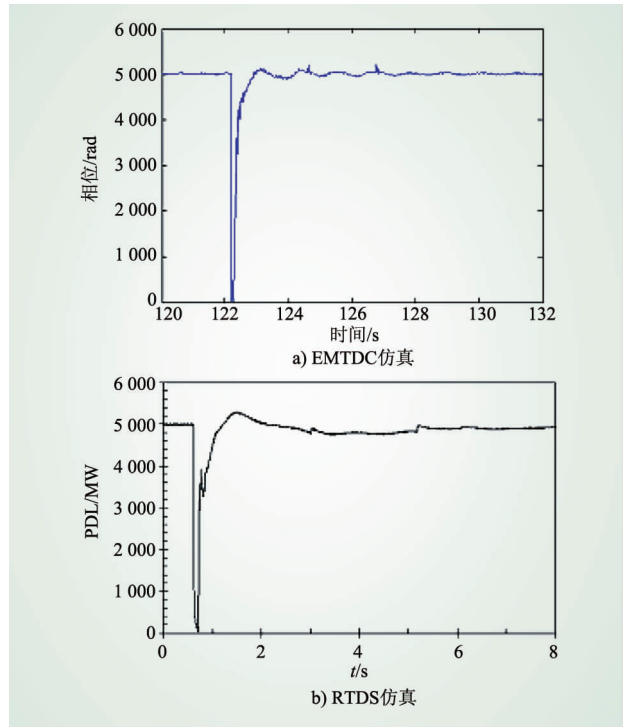


图 9 直流功率轨迹比较

Fig.9 Comparison of DC power flow curves

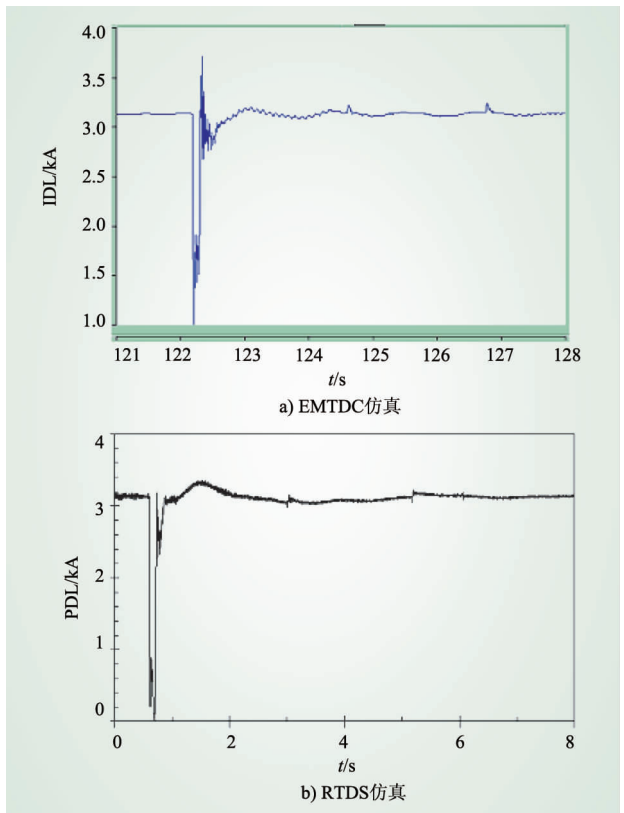


图 10 直流电流轨迹比较

Fig.10 Comparison of DC current curves

RTDS 闭环仿真的直流电流在故障后被限制, 没有像 EMTDC 仿真直流电流过冲。这同时也进一步阐



明了带有详细控制保护设备参与的实时闭环仿真更贴近实际和具有参考意义。

3 结语

基于 RTDS 和特高压直流控制保护样机搭建了云广特高压直流输电系统闭环仿真模型。为验证所搭建的模型的可信性和可靠性,基于 RTDS 和 EMTDC 2 种不同的电磁暂态仿真工具,不仅对模型中的单元件模型特性进行了特性比较,且对云广直流输电“孤岛”运行方式的潮流和暂态特性进行了校核。校核结果显示,基于 RTDS 和 EMTDC 仿真的元件特性、系统潮流和暂态特性基本一致,说明所搭建的 RTDS 和实际控制保护系统的闭环仿真模型的可信性。

基于电磁暂态数字仿真原理的 RTDS 仿真器能够实时地详细模拟直流输电系统,具备全面分析直流输电系统特性的能力;具有实际特高压直流控制保护系统参与的闭环控制仿真,能够详细准确模拟直流系统的动态作用,使得仿真结论更具备实际工程参考价值 and 真实可靠性^[5-8]。本文所述的闭环云广直流输电仿真系统已成功应用于云广特高压直流输电工程相关的多项关键科研项目,从而为云广特高压直流输电系统的建设和运行提供了有力的技术支持和帮助。

参考文献:

- [1] 李立涅. 特高压直流输电的技术特点与工程应用[J]. 电力设备, 2006, 7(3):1-4.
LI Li-cheng. Technical characteristics and engineering applications

of UHVDC power transmission[J]. *Electrical Equipment*, 2006, 7(3):1-4.

- [2] 中国电力工程顾问集团公司, 华东电力设计院, 中南电力设计院, 等. 大容量直流输电交直流系统安全稳定影响分析[R]. 2005.
China Power Engineering Consulting Corp., East China Electric Power Design Institute, Central Southern China Electric Power Design Institute, *et al.* Security and stability analysis for AC-DC power system with bulk power DC transmission[R]. 2005.
- [3] FORSYTH P, KUFFEL R, WIERCHX R *et al.* Comparison of transient stability analysis and Large-scale real time digital simulation [C]//In Proceeding of IEEE Porto Power Tech Conference. Porto (Portugal). 2001,4: 10-13.
- [4] 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[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 1999, 23(23):1-6.
- [5] 南瑞继保电气有限公司. 直流控制技术报告[R]. 2004.
Nari-Relays Electric Co., Ltd. DC controller technical report [R]. 2004.
- [6] RTDS Technologies Co. Ltd. Real time digital simulator power system user manual[R]. 2005.
- [7] SOOD V K. HVDC and FACTS controllers - applications of static converters in power systems [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [8] 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.
XU Zheng. The dynamic analysis of AC-DC power system [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

(责任编辑 张重实)

Modeling studies on real-time closed-loop simulation of UHVDC transmission system

GAO Peng¹, HU Ming¹, CAI Han-sheng², TIAN Jie¹, CHEN Song-lin¹

(1. Nari-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. Technology Research Center, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510623, China)

Abstract: Power system simulation studies are necessary for developing HV, EHV and UHV grids. For lucubrating the UHVDC technologies and the characteristics of UHV integrated AC/DC power grids, a real-time closed-loop simulation model of 'islanded operation' configuration of Yun-Guang UHVDC transmission system was developed based on the RTDS and the ± 800 kV control and protection equipment designed by NARI-relays Cooperation. For verifying the validity and creditability of the proposed model, the electrical characteristics of the single components, the system power flow and transient characteristics were compared with the simulation results of PSCAD/EMTDC. The compared results show that these characteristics are consistent in essence. Hence, the proposed real-time closed-loop simulation model is usable and creditable. The real-time effects of actual UHVDC control and protection equipment are taken into account in the proposed model, thus the closed-loop simulation results can not only reflect the characteristics of AC-DC power system more accurately, but provide valuable information to engineering applications as well. The proposed simulation model has been successfully used in some key UHVDC transmission system research projects, and contributed much in technologies to the construction and the operation of the Yun-Guang UHVDC transmission system.

Key words: UHVDC; real time digital simulation; control and protection; modeling