

基于 RTDS 的交直流混合系统实际故障再现分析

贾旭东¹, 李庚银¹, 赵成勇¹, 肖湘宁¹, 韩伟强², 郭琦²

(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, 北京市 102206;

2. 中国南方电网技术研究中心, 广东省广州市 510623)

摘要: 基于实时数字仿真器(RTDS), 针对实际的交直流混合电网, 搭建了仿真模型, 并将 RTDS 与实际直流输电控制保护装置连接, 建立了一个交直流混合系统实时仿真实验平台。介绍了仿真建模中的关键问题, 提出了 RTDS 元件模型的选择原则。在此基础上, 对南方电网中实际发生的 2 种典型故障进行了仿真研究, 通过仿真实验成功再现了实际故障过程, 并分析得出了故障发生的真实原因, 提出了合理的改进建议。通过仿真结果与实际录波的对比, 证明所建电网模型是准确、可信的, 能够比较真实地反映实际系统的动态特性。

关键词: 电力系统仿真; 交直流混合系统; RTDS; 实际故障

中图分类号: TM721.3; TM743

0 引言

现代电力系统正向着高电压、大规模、智能化方向飞速发展, 电网事故有时会造成非常严重的后果^[1-4]。研究电网实际故障最重要、最有效的手段就是系统仿真^[5-7], 它可以在实验室中再现实际系统的复杂运行, 具有良好的可控性、无破坏性和经济性。通过仿真平台将实际故障再现, 将有助于运行人员分析故障原因, 研究故障后电网中出现的暂态过电压和过电流, 也将为今后避免发生同样的故障、制定故障后正确的限制和保护措施奠定坚实的基础。

为此, 国内外电力工作者进行了大量的实验, 通过各种仿真工具, 对电网实际故障进行模拟, 但其结果大多不能令人满意^[8-11]。2004 年内蒙古电网 500 kV 丰万 I 线发生 C 相短路接地事故, 事故后期的仿真实验无法准确再现故障当时的电压跌落^[12]。2005 年龙政直流系统因交流保护故障导致双极闭锁, 并引起了逆变侧交流网络频率下降, 在后期的仿真研究中, 由于采用了简化的直流系统模型, 限制了仿真结果的精确性, 使之与实际录波之间存在明显的差距^[13]。如何保证在仿真中准确再现实际故障过程, 已成为电力工业界和学术界很关心和希望解决的难题。

本文基于国际公认的实时数字仿真器 RTDS^[14-16], 根据实际电网结构和负荷特性, 搭建了

等值电网仿真模型。介绍了仿真建模中的关键问题, 提出了 RTDS 元件模型的选择原则。将 RTDS 与实际直流输电控制保护装置连接, 建立了一个交直流混合系统实时仿真实验平台。在此基础上, 对实际发生的 2 个典型故障进行了仿真研究。通过仿真实验成功再现了实际故障的全过程, 并且分析得到事故的真实原因, 提出了合理的改进建议。通过仿真结果与实际录波的对比, 证明所建立的交直流混合系统仿真模型是准确、可信的, 能够比较真实地反映实际系统的动态特性。

1 仿真系统建模

1.1 交流系统建模

鉴于 RTDS 硬件设备非常昂贵, 而 RTDS 的基本组成部分即每个组(rack)的计算能力有限, 不可能对整个电网进行仿真计算。因此, 根据现有的 RTDS 硬件资源和所需研究的具体问题建立详细程度适当的电网模型是非常重要的。本实验的重点是分析由各种故障引起的直流系统暂态过电压、过电流和直流控制保护装置的响应特性。因此, 必须对直流输电系统建立详细的模型。对交流系统则可在系统等值的基础上进行简化, 这样在保证仿真结果可信性的基础上, 将大大节省实验资源。

仿真实验模型是根据 2007 年南方交直流混合电网的结构和负荷特性建立, 如图 1 所示, 其中包含了全部 500 kV 交流母线和输电线路, 同时也包含天广、高肇和江城 3 条直流输电系统, 而 220 kV 及以下交流网络和江城直流整流侧交流系统均进行了简化。

收稿日期: 2008-12-29; 修回日期: 2009-03-07。

“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAA02A17); 高等学校学科创新引智计划项目(B08013)。

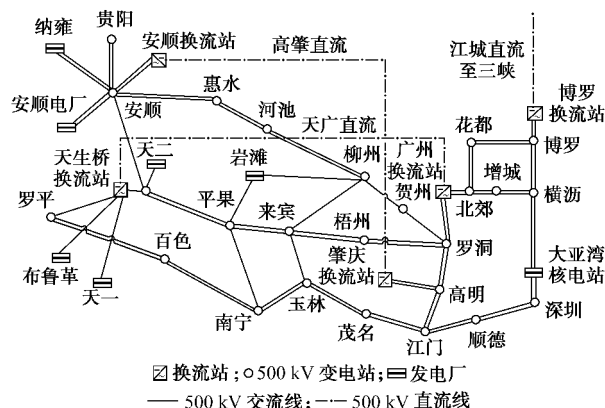


图 1 2007 年南方电网结构

Fig. 1 Structure of China southern power grid in 2007

1.2 直流系统建模

RTDS 对直流输电系统各元件都进行了详细而准确的模拟,包括换流阀、换流变压器、直流线路、平波电抗器和交直流滤波器等。但 RTDS 中的模型并非十分完善,本文以直流输电系统最核心的换流阀组模块为例,对其模型和算法进行了详细的分析,提出了元件模型的选择原则。

1.2.1 换流变压器模型

换流变压器是直流输电系统的核心设备,但是 RTDS 阀组模块中的换流变压器采用理想变压器模型,该模型中仅含有串联电感和变比环节,不含励磁支路,不能模拟变压器饱和特性。而换流变压器饱和特性对直流系统的暂态过程有重要的影响。本文采取在换流变压器交流母线处并联非线性电抗器的方法来模拟其饱和特性,具体结构如附录 A 所示。

目前 RTDS 元件库中非线性电抗器模块有 2 种:SHARC_NLinductor3 和 SHARC_TRF3PSAT 模块,其中后者在对曲线进行分段线性化处理时采用了更多的数据点,因此理论上该模块更加准确。

在额定和考虑饱和 2 种情况下,对 2 个模块分别进行了仿真实验。结果表明:前者所得磁化曲线中空线圈电感值要大于设定值;后者如采用饱和模型 sat V3 选项,所得磁化曲线中空线圈电感值与设定值一致。由此说明,仿真实验结果和理论分析一致,选用 SHARC_TRF3PSAT 模块对换流变饱和特性的模拟更加准确。

1.2.2 点火脉冲算法

RTDS 通过数字量输入时标(DITS)采集卡将外部控制器的 6 位触发脉冲信号送给换流阀,其接收到点火脉冲的时刻是随机的。而计算程序是在接收到点火脉冲后下一个时步的开始时刻做出响应。所以 RTDS 从接收到点火脉冲到响应的的时间误差在 0~1 个时步之间。如果仿真步长采用 50 μ s,由

此产生的误差相当于 0.9 电角度,进而会引发以下问题:

1) RTDS 不能对换流器触发角的微调产生连续响应。

2) 产生实际系统中并不存在的非特征谐波。

为了解决上述问题,本文采用改进点火脉冲算法。当 RTDS 接收到触发脉冲后 1 个时步内,在阀的导通电阻上串接一个反向的电压源 V_r 。在仿真器接收脉冲信号 1 个时步后,该电压源被置 0。其中 V_r 由下式计算得出:

$$V_r = V_p \frac{\Delta f}{\Delta t} = V_p f \quad (1)$$

式中: Δt 为仿真步长; V_p 为换流阀的预测正向电压; f 为脉冲分度,其数值在 0~1 之间; Δf 为脉冲分度变化量。

由于 DITS 卡的采样步长可达 60 ns (相当于 0.001 08 $^\circ$),因此可以精确得到脉冲分度的数值。改进点火脉冲算法原理如图 2 所示。

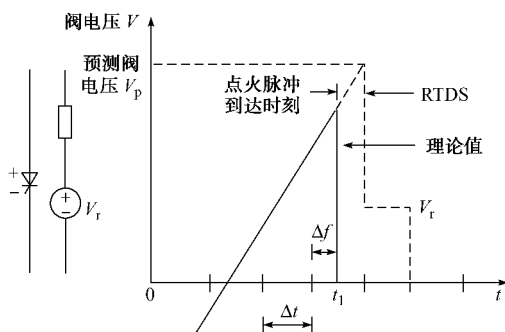


图 2 改进点火脉冲

Fig. 2 Algorithm of improved firing pulse

改进点火脉冲算法避免了随机误差的产生,可以在 50 μ s 的仿真步长下,取得 2 μ s 的阀组模拟精度。通过测量得到的脉冲分度,实现了对触发角微调的连续响应,很好地改进了直流仿真系统的运行稳定性。但同时,该算法增加了一个固定时步的延迟。另外,从换流阀关断到导通状态的转换,内部计算程序采用的梯形积分法需要 0.5 个时步的计算时间。因此,从触发脉冲发出到换流阀导通总的等效延迟为 1.5 个时步。解决延迟的办法有 2 种:

1) 使锁相环发出的相位信号增加,其增加的角度应与 1.5 个时步对应。如果步长是 50 μ s,系统频率是 50 Hz,则对应的角度为 1.35 $^\circ$ 。

2) 触发延迟角 α 减小,减小的角度也与 1.5 个时步对应,即 1.35 $^\circ$ 。

1.3 直流输电控制和保护装置

直流输电控制器是直流输电系统的核心,其特性很大程度上决定了直流输电系统的稳态和暂态响应。因此必须精确地模拟直流控制器,才能真实反

映出交直流电力系统的运行特性。而应用现有的仿真工具,所搭建的各种直流控制器模型都进行了不同程度的简化,无法完全真实地反映实际直流控制器的响应特性。

本文利用南方电网公司电网仿真实验室的一体化综合仿真平台即 RTDS 与实际直流输电控制保护装置连接,构成闭环实验系统,建立交直流混合系统实时仿真实验平台。该套装置包含直流站控屏、直流极控屏和直流保护屏,采用与现场设备一致的软件逻辑,实现了对直流场断路器、开关和接地刀闸的模拟及触发脉冲信号的产生和直流保护等功能。

以上各控制保护屏柜之间、屏柜与 RTDS 之间通过硬件连接实现数据和信息交换。该套控制装置基本真实地反映了实际直流输电系统的特性,也为实际故障的成功再现奠定了基础。

2 仿真实验及结果分析

基于所建立的 RTDS 交直流混合系统实时仿真实验平台,对 2004 年 7 月 3 日 500 kV 莞鹏线 B 相跳闸、2004 年 10 月 8 日高肇直流极 1 单极换相失败 2 个典型故障进行了仿真实验。特别是,2004 年 10 月 8 日高肇直流极 1 共连续发生了 4 次单极换相失败,后期的仿真实验也一直没有能完全重现实际故障过程。

2.1 仿真实验 1

2004 年 7 月 3 日 13:07,广东电网 500 kV 莞鹏线 B 相发生接地短路故障,线路保护跳闸,故障消除后,重合闸成功。故障持续期间造成高肇、天广和三广直流输电系统换相失败。

根据事故原因和顺序事件记录器(SER)的现场记录进行仿真实验。以高肇直流输电系统为例,图 3 给出了其逆变侧极 2 各电气量仿真实验结果和实际录波对比。500 kV 莞鹏线 B 相电流仿真实验结果和实际录波对比如图 4 所示。

从实验结果可以看出,莞鹏线 B 相电流和高肇直流系统各电气量仿真实验波形均与实际故障录波的结果完全一致。说明通过仿真实验比较成功地再现了实际故障的全过程。由此证明,所建立的 RTDS 南方交直流混合电网仿真模型是准确、可信的,能够比较真实地反映实际系统的动态特性。

2.2 仿真实验 2

2004 年 10 月 8 日 11:42:30,高肇直流系统极 1 发生单极换相失败。约 40 ms 后,换相失败自动恢复正常运行。此后极 1 又接连发生了 3 次单极换相失败。事故的原因一直未能查明,后期的仿真实验也没有能成功再现实际故障过程。由于没有任何现场故障报告作为参考,因此只能通过对实际录波的分析来推测事故原因。

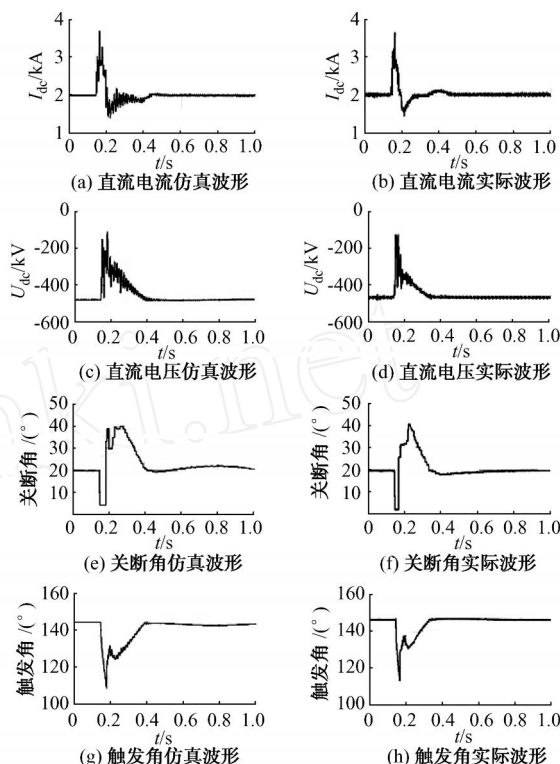


图 3 高肇直流逆变侧极 2 仿真与实际波形

Fig. 3 Simulation results and fault recordings of inverter's pole 2 from Gao Zhao HVDC project

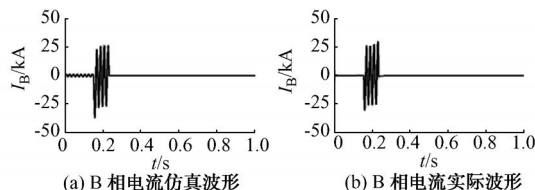


图 4 莞鹏线 B 相电流仿真与实际波形

Fig. 4 Simulation results and fault recordings of phase B current from Guan-Peng line

经过对逆变侧换流母线交流电压、极 1 和极 2 直流电压、直流电流实际录波的分析得出,该次换相失败不应是由交流系统故障引起。理由是:

- 1) 逆变侧换流母线交流电压下降仅为 5%,如此小的电压降落不足以引起换相失败。
- 2) 如果逆变侧交流系统发生故障,则应该引起双极而不是单极换相失败。
- 3) 从时间顺序上,应是先发生了换相失败,然后引起了电压跌落。

由此推断故障的原因应该在于直流系统本身。实际录波显示,竖琴脉冲完好无损,说明直流极控发给阀基电子设备(VBE)的触发脉冲正确。而 VBE 发给换流阀的触发脉冲可能会有丢失的现象。图 5 所示为高肇直流逆变侧极 1(Y,y 接线)换流变压器阀侧三相交流电流实际录波,从中可以观察到是

3 号阀到 5 号阀换相过程失败。由此可以推断是 VBE 发给该换流桥 5 号阀的触发脉冲丢失引起了极 1 换相失败,进而影响了交流系统和极 2 的正常运行。

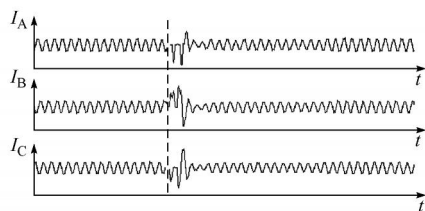


图 5 逆变侧极 1(Y,y 接线)换流变阀侧三相交流电流
Fig. 5 Secondary phase currents of the Y,y connection transformer of inverter's pole 1

仿真实验结果和实际录波对比如图 6、图 7 所示。从实验结果中可以看出,仿真实验波形与实际故障录波完全一致。由此说明,推测的故障原因正确无误,仿真实验比较真实地反映了实际故障过程。引起换相失败的原因有很多,除了常见的交流系统故障外,触发脉冲丢失也会引起换相失败,而且在实际运行过程中是有可能出现的。

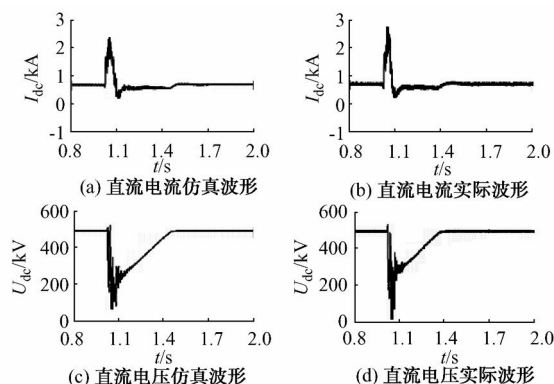


图 6 逆变侧极 1 仿真与实际波形
Fig. 6 Simulation results and fault recordings of inverter's pole 1

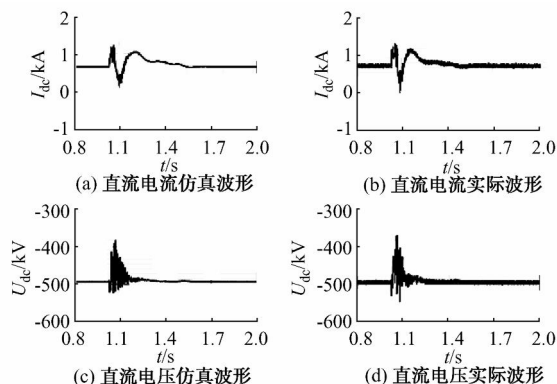


图 7 逆变侧极 2 仿真与实际波形
Fig. 7 Simulation results and fault recordings of inverter's pole 2

以上仿真实验仅模拟了第 1 次换相失败的过程。通过对该时间段内所有故障录波的分析发现,4 次故障均是因同一个阀(极 1(Y,y 接线)换流变压器所连接的换流桥 5 号阀)未能正确触发造成的。实际故障录波显示竖琴脉冲均正常,由此推测当时实际触发脉冲发生装置 VBE 可能存在故障,需要检修或更换。

3 结语

本文基于 RTDS 根据南方电网结构和负荷特性,搭建了等值电网仿真模型。介绍了仿真建模中的关键问题,提出了 RTDS 元件模型的选择原则。将 RTDS 与实际直流控制保护装置连接,建立了交直流混合系统实时仿真实验平台。在此基础上,对 500 kV 莞鹏线 B 相跳闸、高肇直流极 1 单极换相失败 2 个典型故障进行了仿真研究。仿真实验成功再现了实际故障过程。通过仿真结果与实际录波的对比,证明所建交直流混合系统仿真模型是准确、可信的,能够比较真实地反映实际系统的动态特性。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the Eastern interconnection blackout in 2003. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [2] 陈向宜, 陈允平, 李春艳, 等. 构建大电网安全防御体系——欧洲大停电事故的分析及思考. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 4-8.
CHEN Xiangyi, CHEN Yunping, LI Chunyan, et al. Constructing wide area security defensive system in bulk power grid—a pondering over the large-scale blackout in the European power grid on Nov. 4. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 4-8.
- [3] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 1-4.
LI Zaihua, BAI Xiaomin, DING Jian, et al. Analysis of the Western Europe blackout. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 1-4.
- [4] 高翔, 高伏英, 杨增辉. 华东电网因直流故障的频率事故分析. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 102-107.
GAO Xiang, GAO Fuying, YANG Zenghui. Frequency accident analysis in East China grid due to DC line fault. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 102-107.
- [5] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.
TANG Yong. Present situation and development of power

- system simulation technologies. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [6] NIE X, CHEN Y, DINAVAH V. Real-time transient simulation based on a robust two-layer network equivalent. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1771-1781.
- [7] HOCKENBERRY J R, LESIEUTE B C. Evaluation of uncertainty in dynamic simulations of power system models: the probabilistic collocation method. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1483-1491.
- [8] WALVE K. Modeling of power system components at severe disturbances// Proceedings of International Conference on Large High Voltage Electric System, August 27-September 4, 1986, Paris, France: 38-18.
- [9] SCHLEIF F R, WHITE J H. Damping for the Northwest-Southwest tie line oscillations: an analog study. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1966, 85(12): 1239-1247.
- [10] SHI Y, SHAO F Y, ZENG N C, et al. Study of AC/DC coupling for Three Gorges to Changzhou HVDC system// Proceedings of 1998 International Conference on Power System Technology: Vol 1, August 12-18, 1998, Beijing, China: 466-471.
- [11] 黄宗君, 李兴源, 晁剑, 等. 贵阳南部电网“7·7”事故的仿真反演和分析. 电力系统自动化, 2007, 31(9): 95-100.
HUANG Zongjun, LI Xingyuan, CHAO Jian, et al. Guiyang South grid “7·7” faults simulation and analysis. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(9): 95-100.
- [12] 梁玉枝, 张莉, 丰万 I 线 C 相瞬时接地故障动态仿真. 华北电力技术, 2005(7): 9-11.
LIANG Yuzhi, ZHANG Li. Dynamic simulation for instantaneous ground faults of C-phase in Feng-Wan line I. North China Electric Power, 2005(7): 9-11.
- [13] 龙侃沁, 武寒, 黄志龙, 等. 龙政直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 101-104.
LONG Kanqin, WU Han, HUANG Zhilong, et al. Analysis of frequency characteristics in East China due to Long-Zheng DC bi-polar block fault. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 101-104.
- [14] KUFFEL R, GIESBRECHT J, MAGUIRE T, et al. RTDS — A fully digital power system simulator operation in real time// Conference Proceedings on Communications, Power, and Computing (WESCANEX '95): Vol 2, May 15-16, 1995, Winnipeg, Canada: 300-305.
- [15] DUCHEN H, LAGERKVIST M, KUFFEL R, et al. HVDC simulation and control system testing using a real-time digital simulator (RTDS)// Proceedings of First International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS '95), April 5-7, 1995, College Station, TX, USA: 213.
- [16] KUFFEL R, WIERCKX R P, DUCHEN H, et al. Expanding an analogue HVDC simulator's modelling capability using a real-time digital simulator (RTDS)// Proceedings of First International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS '95), April 5-7, 1995, College Station, TX, USA: 199.

贾旭东(1980—),男,博士研究生,主要研究方向:高压直流输电、电力系统数字仿真。E-mail: jia-xudong@163.com

李庚银(1964—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电能质量、电力市场、新型输配电技术。E-mail: ligy@ncepu.edu.cn

赵成勇(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电能质量分析与控制、直流输电、微机监测与控制。

Real-time Simulation Studies of Actual Faults in AC/DC Power System Based on RTDS

JIA Xudong¹, LI Gengyin¹, ZHAO Chengyong¹, XIAO Xiangning¹, HAN Weiqiang², QUO Qi²

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: An AC-DC real-time simulation system is developed, in which an equivalent model of China's southern power grid is built on a real-time digital simulator (RTDS), while the external actual DC control and protection devices are connected in a closed loop. The key problems in modeling are discussed and suggestions are made to improve the RTDS model. Two typical actual faults have been successfully simulated by use of the RTDS model. The real causes of faults are analyzed, and some improvement measures are put forward. The simulation results are compared against the field fault recordings. It is demonstrated that the simulation models proposed are accurate and reliable. The RTDS model established can accurately reflect the dynamic characteristics of the real power system.

This work is supported by Key Project of the National Science & Technology Pillar Program in the Eleventh Five-year Plan Period (No. 2006BAA02A17) and the National 111 Project of China (No. B08013).

Key words: power system simulation; AC-DC power system; RTDS; actual faults